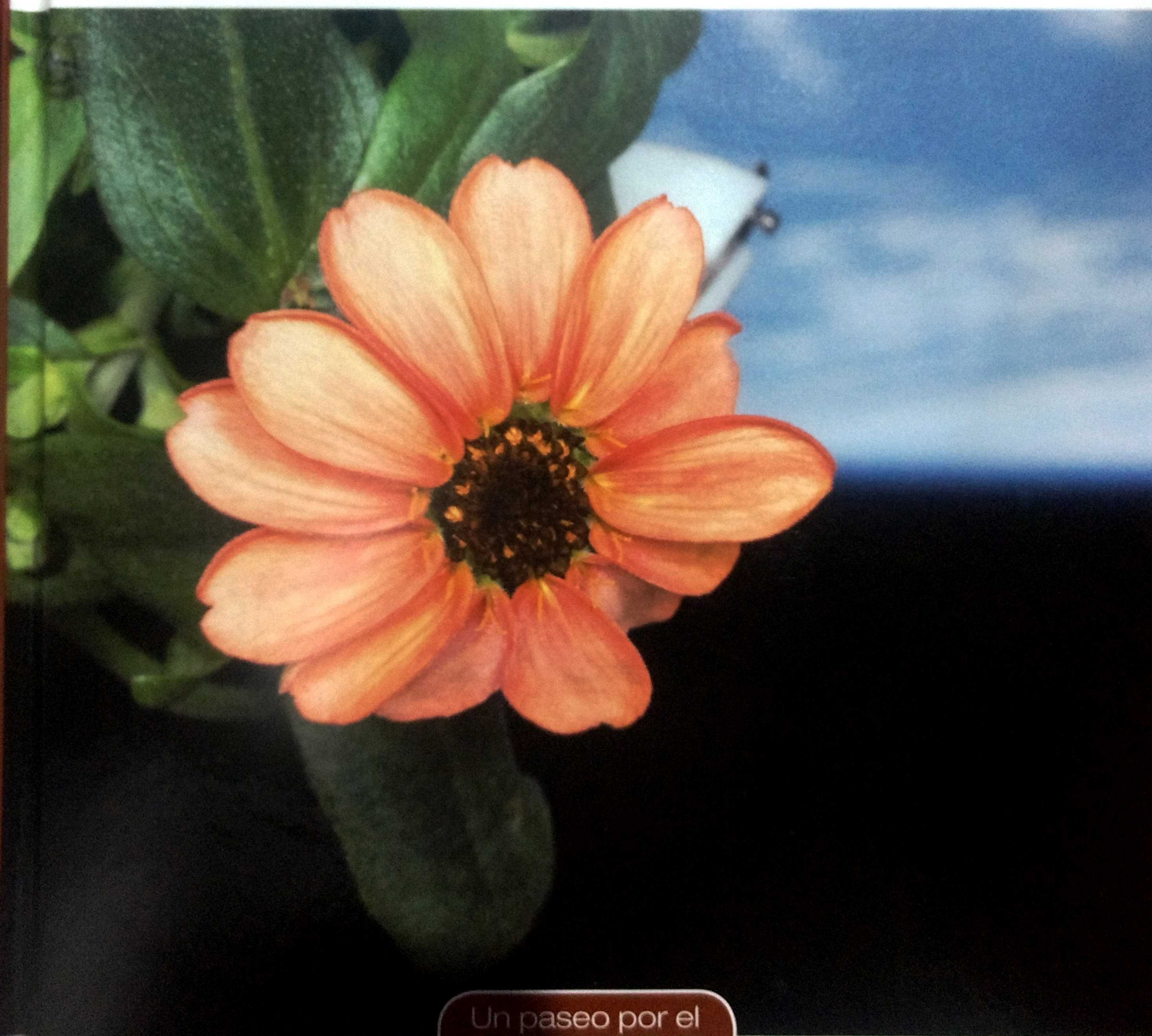


Ciencia en el esp

Observaciones y experimentos
fuera del ámbito terrestre



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigiralización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmureau.blogspot.com/>

Ciencia en el espacio

Observaciones y experimentos
fuera del ámbito terrestre

RBA

Imagen de cubierta: El ejemplar de *Zinnia* de la fotografía es la primera planta que se ha cultivado y crecido en la Estación Espacial Internacional. Al fondo de la imagen se aprecia el contorno de la Tierra.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Arturo Quirantes Sierra por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: 90.5 WESA: 145; Age Fotostock: 48; Archivo RBA: 31, 53b; Dr. Christopher Burrows, ESA/STScI; Diego Delso: 35b; ESA/Rosetta/NAVCAM: 75b; Janice Haney Carr, Centers for Disease Control and Prevention: 137; Dave Harlow: 27; NASA: portada, 19, 25, 53a, 62, 63, 65, 69, 75a, 87b, 91, 93, 103ai/b, 103ad, 111, 113b, 123, 131, 141; NASA/JPL/Space Science Institute: 66-67; NASA/JPL/Universidad de Arizona/Universidad de Leicester: 57; NASA/LOIRP: 39; NOAA: 35a; SWPC/NOAA: 33; Wouter Weggelaar: 57a; XMM-Newton, ESA, NASA: 113a.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-9085-4

Depósito legal: B-22060-2017

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Observación de la Tierra 13
CAPÍTULO 2	Exploración del sistema solar 41
CAPÍTULO 3	Astrofísica y cosmología 81
CAPÍTULO 4	El ser humano en el espacio 117
CAPÍTULO 5	Nuestro lugar en el cosmos 133
LECTURAS RECOMENDADAS	155
ÍNDICE	157

INTRODUCCIÓN

Resulta difícil encontrar una rama de la física clásica que no incluya una aportación relevante de Isaac Newton. Sus tres leyes de la mecánica, que describen fenómenos como la inercia, los efectos de una fuerza y la acción-reacción, fueron la verdad incontestable de la realidad física durante más de dos siglos. Solo a comienzos del siglo xx la mecánica newtoniana tuvo que ser reformada para acomodar los nuevos fenómenos que se observaban a altas velocidades y escala atómica. Fue necesario el talento de un genio como Albert Einstein para modificar la ley de Newton de gravitación universal y, aun en nuestros días, esta continúa siendo una excelente y sencilla aproximación a los fenómenos asociados a la gravedad.

Newton fue un gigante pero no estuvo solo, y su famosa afirmación de haber logrado el éxito por subirse a hombros de gigantes es un tributo sincero y humilde a la labor de quienes le precedieron.

Durante la época de la Ilustración hubo muchos hombres (y algunas mujeres) que se dedicaron a convertir la ciencia en una actividad humana con normas y procedimientos eficaces. Se crearon sociedades científicas y universidades, se fundaron publicaciones especializadas, se realizaron demostraciones experi-

mentales y, en general, se afianzó la forma de hacer ciencia que hoy conocemos.

Eso no significa que la actividad científica fuese inexistente antes del siglo XVIII. Desde Arquímedes hasta Paracelso, desde Demócrito hasta Avicena, desde Euclides hasta Maimónides la historia nos muestra una amplia variedad de científicos en tiempos históricos, si por ciencia entendemos el proceso de autocorrección de errores basado en examinar la naturaleza, explicar lo observado en base a leyes y teorías, comunicar los resultados y aprender de los errores cometidos.

Podemos remontarnos hasta eras prehistóricas e imaginarnos al chamán de la tribu evaluando la utilidad de los remedios herbales en función de si curan al enfermo o lo matan; decidiendo si las mismas nubes que trajeron lluvias en el pasado volverán a hacerlo esta temporada; escogiendo una roca u otra para fabricar puntas de lanza. Eran tiempos de supervivencia sin lugar para el error. Un cazador con la creencia de que las altas hierbas junto al arroyo se mueven por el viento tendrá problemas si resulta que el responsable es un tigre de dientes de sable. Adoptar la hipótesis equivocada era algo que se pagaba caro.

Los fenómenos celestes tenían el inconveniente adicional de que no se podían estudiar usando el procedimiento de tanteo y error, no había posibilidad de experimentar. Uno puede escoger entre comer una baya u otra pero no puede escoger la posición de las estrellas o la hora de la salida del Sol. Con el tiempo se desarrolló una forma *sui generis* de interaccionar con la naturaleza de las cosas del cielo: suponer la existencia de seres superiores y convencerlos de que fuesen benévolos. Surgió toda una panoplia de dioses que ocuparon las constelaciones y los planetas, el Sol y la Luna. La lluvia y la sequía, los periodos de frío y calor, la abundancia de las cosechas o la carestía de alimentos dependían de su capricho, y cualquier alteración en la forma de cometas o eclipses de Sol se entendía como una manifestación de la ira divina, así que aplacar a los moradores de los cielos con plegarias y ofrendas era una buena política.

Con el tiempo las grandes religiones monoteístas asignaron un gran y único Dios al cuidado del cielo y la tierra y, como con-

secuencia, el universo quedó dividido en dos regiones: sublunar y supralunar. En la región sublunar las cosas sucedían de forma caótica y desorganizada, fruto del pecado y de la imperfección de los hombres; la región supralunar, regida por Dios, era un universo de armoniosa perfección. Esta separación sufrió una sacudida cuando hombres como Galileo Galilei comenzaron a observar el cielo y descubrieron que el mundo supralunar no era el lugar ideal que se creía hasta entonces.

La reacción del poder establecido no se hizo esperar, y el propio Galileo sufrió las consecuencias, pero no había vuelta atrás. Basándose en las nuevas observaciones, de una precisión nunca antes lograda, Johannes Kepler concluyó que los planetas giraban en elipses alrededor del Sol. La importancia de su descubrimiento era enorme, ya que destruía la naturaleza ideal de los cielos aceptada hasta entonces. ¿Por qué Dios permitía que los planetas siguiesen órbitas elípticas, tan alejadas conceptualmente de la perfección que ofrece el movimiento circular?

Quizá, pensaron algunos, no existen dos zonas en el universo con reglas distintas sino una sola. Acaso las mismas leyes matemáticas que describen la caída de una manzana en la Tierra pueden explicar el movimiento de traslación de la Luna. Newton fue el primero en elevar este concepto al rango de principio fundamental. A partir de entonces dejó de haber reglas especiales para el mundo supralunar, y lo que sirviera para la Tierra también sería de aplicación para el cosmos.

Durante los siglos que siguieron, los científicos, armados con instrumentos cada vez más perfeccionados, se dedicaron a escudriñar la naturaleza con creciente intensidad e interés y descubrieron que los cielos contenían mayor cantidad y variedad de objetos de lo que cabía imaginar. El universo pasó a estar formado por un sistema planetario con cientos de millones de kilómetros de tamaño; luego se extendió a un universo-isla conocido como galaxia, con unas dimensiones de billones de kilómetros. Hace poco más de un siglo aprendimos que la extensa Vía Láctea es tan solo una entre miles de millones de otras galaxias, separadas por distancias casi inconcebibles. No contentos con ello, algunos científicos conjeturan hoy que el universo observable no

es sino una parte de un metauniverso cuya amplitud desafía a la imaginación.

Las fronteras del cosmos comenzaron a expandirse gracias a observaciones realizadas en la Tierra, y pronto se hizo patente que para observar el espacio lo mejor es salir de nuestro planeta. La atmósfera terrestre bloquea la mayor parte de las frecuencias del espectro electromagnético, lo que obliga a los astrofísicos a sacar sus instrumentos al espacio para abrir las nuevas ventanas de observación como los rayos X, gamma, ultravioleta o microondas. Más cerca de nosotros, el sistema solar es rico en objetos de todo tipo, desde motas de polvo hasta grandes planetas, que guardan los secretos sobre su propia formación a la espera de que alguien vaya a buscarlos.

No fue fácil saltar la barrera del espacio. A comienzos del siglo xx se utilizaron globos atmosféricos, pero hubo que esperar hasta después de la Segunda Guerra Mundial para que los primeros cohetes se elevaran desde la superficie terrestre y comenzaran a sondear el universo, siguiendo la estela de pioneros de la astronáutica como el ruso Konstantin Tsiolkovski, el estadounidense Robert Goddard y el alemán Wernher von Braun. El sencillo pitido electrónico del Sputnik 1 soviético en 1957 dio paso a una flota de naves espaciales que se extendieron por todos los rincones del sistema solar.

No solo aparecieron nuevos campos de la ciencia como la planetología o la exobiología, sino que las ciencias tradicionales encontraron nuevos objetos de estudio. La geología o la dinámica de la atmósfera pueden ser ahora aplicadas en planetas y satélites, cometas y asteroides, proporcionando un conocimiento mucho más extenso que el generado a partir del estudio de un solo mundo. Gracias a ello sabemos que el efecto invernadero o el invierno nuclear son fenómenos que pueden desarrollarse en otros planetas. El cambio climático inducido por la elevación de los niveles de CO₂ atmosférico, cuyos efectos perjudiciales comenzamos a notar en la Tierra, convirtió en tiempos remotos el planeta Venus en un infierno, y los indicios que hoy encontramos en la superficie de Marte nos recuerdan que ni siquiera mil millones de años con agua líquida constituyen garantía de futuro.

Pero la ciencia del espacio no se limita a la observación de galaxias lejanas o sistemas planetarios más o menos accesibles. Hemos descubierto que la Tierra es un objetivo científico de primera magnitud, y la órbita baja, un lugar ideal para observar nuestro planeta como un todo, de forma integral, al margen de las fronteras nacionales y rencillas de credo. A una altura de pocos cientos de kilómetros podemos buscar restos de antiguas civilizaciones, medir el nivel de los grandes acuíferos, predecir el tiempo que hará mañana en nuestra región y gestionar nuestros recursos naturales.

Cuando el ser humano pudo viajar al espacio abrió un nuevo campo de estudio: el propio hombre. Vivir en un ambiente tan radicalmente diferente al que disfrutamos en la Tierra constituye un reto de índole fisiológica y psicológica, e incluso el establecimiento de observatorios en el espacio ha exigido —y continuará exigiendo— profundos avances en ciencia e ingeniería de materiales. Todavía estamos desarrollando formas de viajar y establecernos en el espacio, un ambiente hostil en extremo que no deja lugar a los errores, y habrá que llevar la ciencia y la tecnología al extremo si es que vamos a expandirnos más allá de nuestro mundo.

No tenemos opción. Como dijo una vez el pionero ruso Tsiolkovski, la Tierra es la cuna de la humanidad pero uno no puede vivir siempre en la cuna. Habida cuenta de nuestra historia de exploración y colonización, es seguro que la humanidad se extenderá por la nueva frontera del espacio. Allí construiremos nuestras fábricas y nuestras ciudades, generaremos la energía que necesitamos, obtendremos materias primas, nos estableceremos, viajaremos y viviremos de forma permanente. Y, por supuesto, allí seguiremos haciendo ciencia. Una ciencia parecida a la que conocemos, pero muy distinta al mismo tiempo.

Hace poco más de cien años Einstein desarrollaba su teoría de la relatividad, y la mecánica cuántica estaba aún en proceso de revolucionar la física. Si la historia ha de servirnos como ejemplo, podemos tomar como seguro que el espacio abrirá nuevos campos de estudio, y al mismo tiempo nos dará nuevas formas de observar el universo, algunas de las cuales hemos comenza-

do a atisbar ahora como las ondas gravitatorias o la astronomía de neutrinos. Puede que los historiadores del futuro se rían de nuestra ingenuidad, o quizá se admirarán de nuestro ingenio; de las mismas cualidades que adornaron a los grandes hombres y mujeres de siglos pasados y que, ahora, admiramos nosotros.

CAPÍTULO 1

Observación de la Tierra

La observación espacial de nuestro planeta permite obtener información sobre su atmósfera y océanos; ayuda a prevenir desastres naturales; mide el efecto del ser humano sobre su ambiente y nos advierte contra los peligros del cambio climático a escala global.

El 17 de junio de 1861 la Guerra de Secesión estadounidense todavía no era sino un conjunto de escaramuzas sin importancia. Ese día el presidente Abraham Lincoln fue testigo del despegue del globo Enterprise. A bordo, su propietario Thaddeus Lowe observaba todo lo que sucedía en un rango de ochenta kilómetros a la redonda e informaba al propio presidente mediante un telégrafo. Un mes después se desencadenó la primera gran batalla de la guerra y, a los pocos días, Lowe recibió la orden de construir una flota de globos aerostáticos para reconocimiento militar.

La ascensión de Lowe no fue la primera vez en que se utilizaron globos en el campo de batalla (ya en 1794 Francia usó uno durante la batalla de Fleurus), pero podemos considerarla como el primer esfuerzo metódico por establecer un sistema de observación aérea. En décadas posteriores las principales naciones crearon redes de globos, a los que en su momento se unieron aviones a hélice. Los ejércitos que libraron guerras en el siglo xx incorporaron la observación desde el cielo de forma tan habitual como la artillería o los tanques, y en nuestros días uno de los primeros actos en una batalla consiste en cegar los sistemas de vigilancia del adversario.

Pronto se hizo evidente que los beneficios de espiar desde el cielo son asimismo aplicables al sector civil. Las plataformas aéreas son capaces de fotografiar amplias zonas de la superficie terrestre para regular actividades pesqueras y agrícolas; explorar regiones remotas en busca de recursos petrolíferos y minerales; vigilar los riesgos naturales como terremotos o incendios forestales; ayudar en la predicción meteorológica; regular el tráfico terrestre, marítimo y aéreo. Las posibilidades son casi ilimitadas para un nuevo campo de estudio que requirió un nuevo término: la teledetección (*remote sensing*).

Con el advenimiento de la era espacial la observación de la Tierra comenzó a convertirse en una actividad permanente y global. En lugar de limitar el reconocimiento del terreno a unas pocas horas o días, los satélites en órbita permiten escudriñar la superficie terrestre durante años, a una altura superior a la de cualquier capa de nubes y sin detenerse ante fronteras naturales o políticas. El estudio desde el cielo comenzó por la propia Tierra.

DE QUÉ TRATA LA TELEDETECCIÓN

En diciembre de 1986 la Asamblea General de las Naciones Unidas definió la teledetección como «la detección de la superficie de la Tierra desde el espacio mediante el uso de las propiedades de las ondas electromagnéticas emitidas, reflejadas o difractadas por los objetos detectados» y la reconoció como una actividad que promueve la protección del medio ambiente, ayuda a proteger a la humanidad frente a desastres naturales y, en consecuencia, debe ser desarrollada con fines pacíficos y compartida por todas las naciones del mundo. De modo algo más amplio, la teledetección no solamente engloba la captación de información sino también su procesamiento y posteriores deducciones acerca del tamaño, composición y naturaleza del objeto o superficie sometido a estudio.

La teledetección utiliza un equipo sensor que no está en contacto directo con el objeto o suceso que se está examinando, por lo cual también se conoce como *detección remota* y permite efectuar observaciones de forma no intrusiva a grandes distancias.

En un medio material como el agua o el aire puede sondearse con sonido, pero en el espacio se utiliza la radiación electromagnética, particularmente en las bandas de luz visible e infrarrojos, donde el bloqueo por parte de la atmósfera terrestre es mínimo. Habitualmente se utiliza la luz (u otra radiación electromagnética) emitida por el Sol y reflejada por el blanco, en cuyo caso tenemos *teledetección pasiva*, pero también es posible combinar el sistema detector con un emisor de energía como en el caso de un radar, lo que nos permite hablar de *teledetección activa*.

La teledetección va mucho más allá del mero estudio fotográfico y proporciona información adicional mediante el análisis de la energía que emiten y reflejan los cuerpos, ya sean ciudades o el propio planeta Tierra (ver imágenes superiores en la página 19). Un primer dato que puede obtenerse es la temperatura, que indica la longitud de onda en la que el cuerpo emite con mayor intensidad. Así, el cuerpo humano emite microondas, el hierro a temperatura de fundición brilla al rojo vivo, y los discos de acreción de los agujeros negros lanzan rayos gamma correspondientes a temperaturas de millones de grados Celsius.

En segundo lugar, la radiación electromagnética nos permite obtener información sobre la composición del cuerpo del que parte. Eso se debe a que los átomos emiten energía cuando sus electrones saltan de un nivel a otro. Puesto que la longitud de onda de la radiación emitida depende de la diferencia de energía entre niveles, y esta depende a su vez de la composición química, el análisis espectroscópico permite identificar la sustancia emisora. De modo similar, una nube de gas o polvo puede absorber radiación en esas mismas longitudes de onda, y su ausencia permite detectarlas incluso cuando no sean directamente visibles.

Los astrofísicos gustan de recordar la anécdota de Auguste Comte. Este filósofo francés afirmó en 1835 que nunca podríamos determinar la composición química de las estrellas. Pocas décadas después el análisis de la luz del Sol permitió no solamente averiguar su composición sino hallar un nuevo elemento químico desconocido hasta entonces: el helio.

El estudio se complica cuando la luz es absorbida y reemitida por la superficie terrestre, ya que los múltiples elementos del

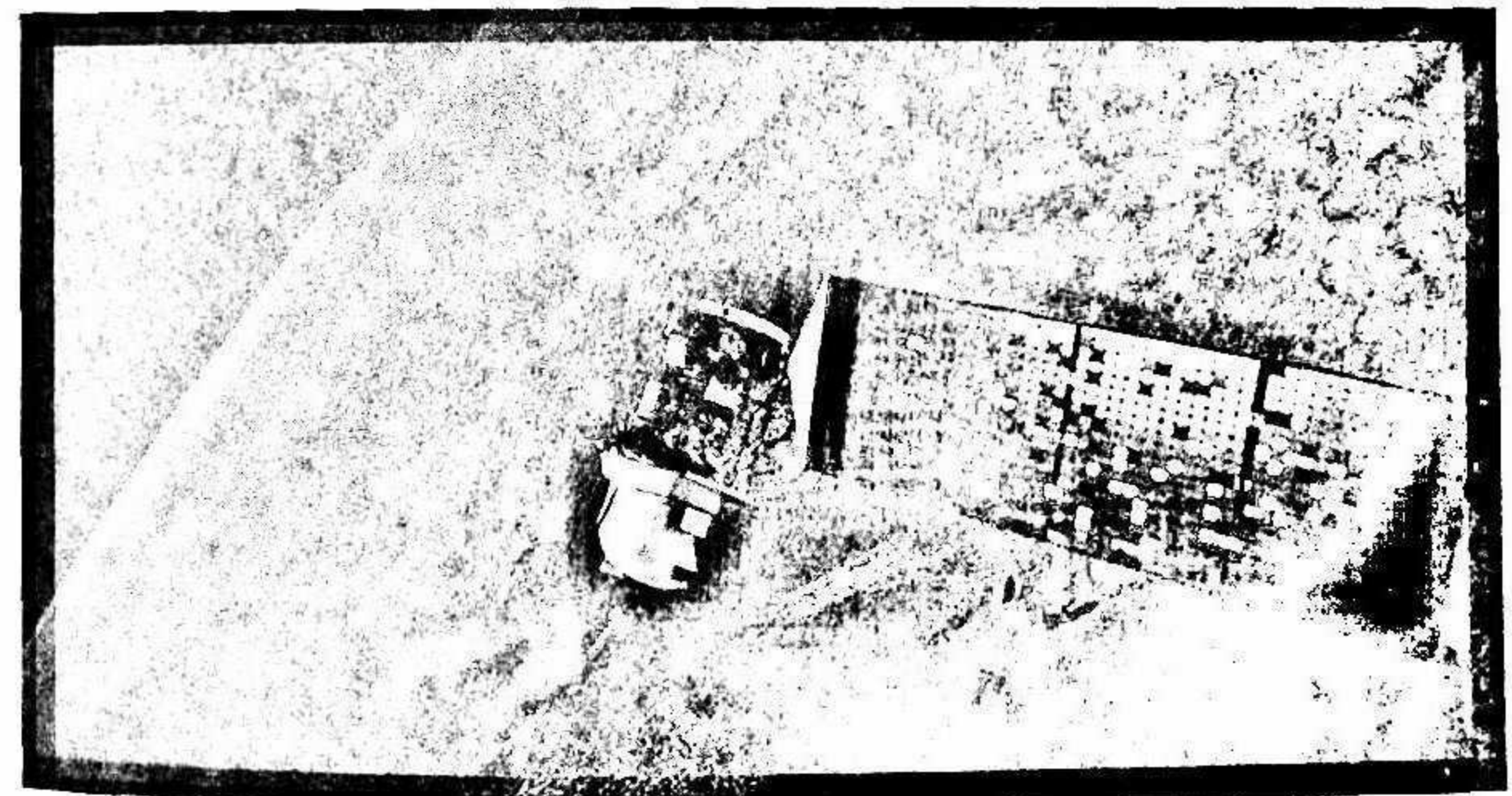
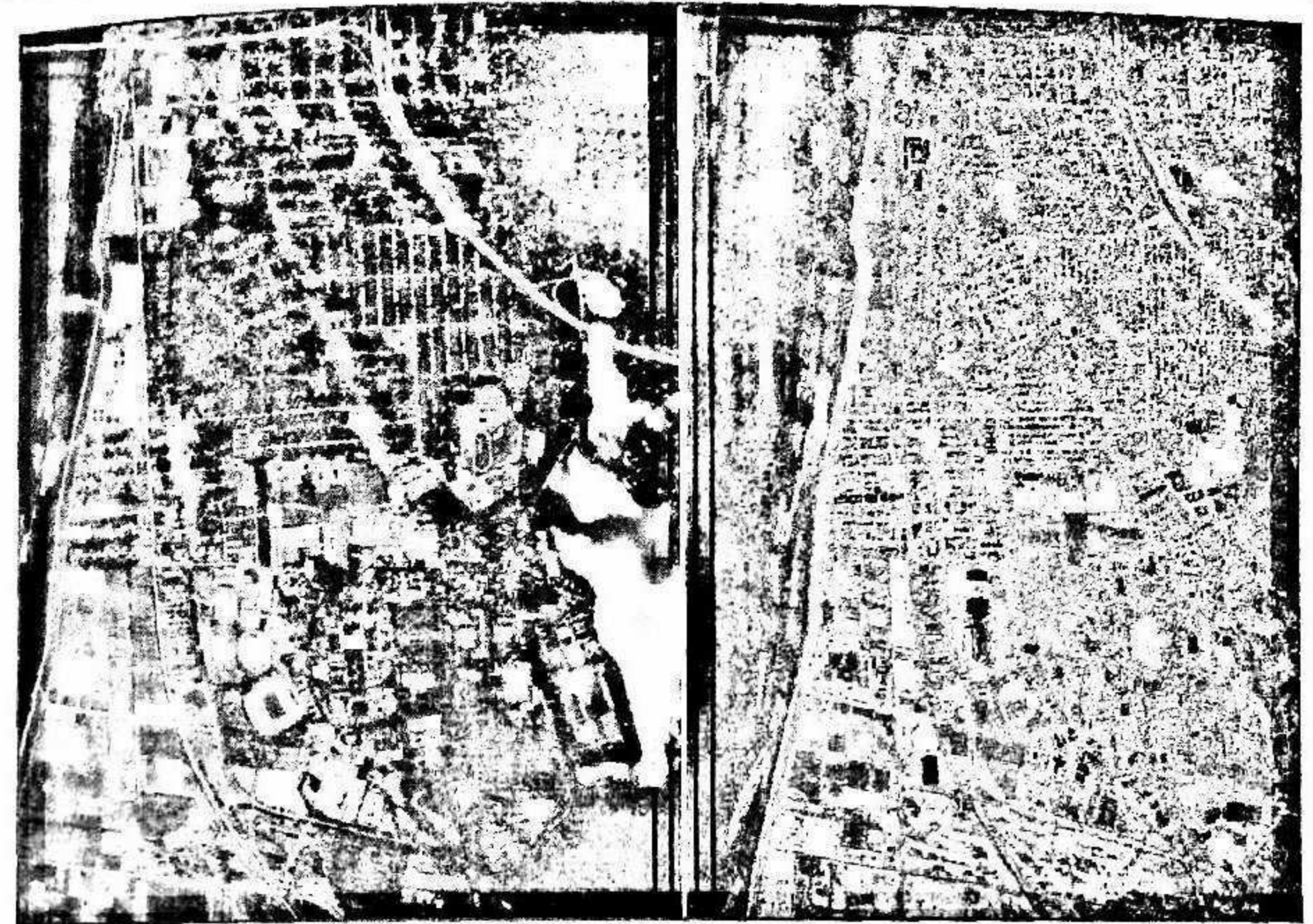
terreno y del aire intervienen a la vez de forma compleja. Los árboles absorben luz de unas longitudes de ondas y la vuelven a emitir en otra forma, el terreno transforma la radiación visible en infrarroja, las briznas de hierba reflejan la luz verde de forma diferente a las agujas de pino o las hojas de un castaño, la arena irradia más luz visible que la vegetación. Es precisamente esta enorme variedad la que permite utilizar la teledetección remota como instrumento de sondeo, permitiendo distinguir entre desierto y sabana, entre terreno selvático y cultivado, entre marismas y praderas.

Existen diversos dispositivos capaces de extraer información desde un satélite en órbita con fines de teledetección. El *radiómetro* mide la intensidad de la radiación electromagnética total emitida en diversas bandas del espectro electromagnético (luz visible, microondas, infrarrojo, ultravioleta). El *espectrómetro* analiza la radiación en busca de los rasgos característicos de los distintos elementos y compuestos químicos que la generaron; cuando se obtienen medidas a varias longitudes de ondas se denomina *multiespectrómetro*.

El *radar* analiza un pulso de ondas de radio o microondas reflejado por una superficie o un objeto, y permite determinar su distancia. Si se utilizan ondas de luz tenemos un *lidar* (acrónimo del inglés LIDAR, por *Light Detection and Ranging*), el cual puede ser usado como altímetro de alta precisión para cartografiar el territorio; también puede detectar partículas en suspensión aérea o acuática, como las procedentes de una erupción volcánica o una colonia de algas. Cada longitud de onda (cada «color» de la luz) proporciona información sobre la composición y procedencia de la radiación, y la información de diversas longitudes de onda puede combinarse para obtener una imagen más completa.

LO QUE EL PAISAJE NOS CUENTA

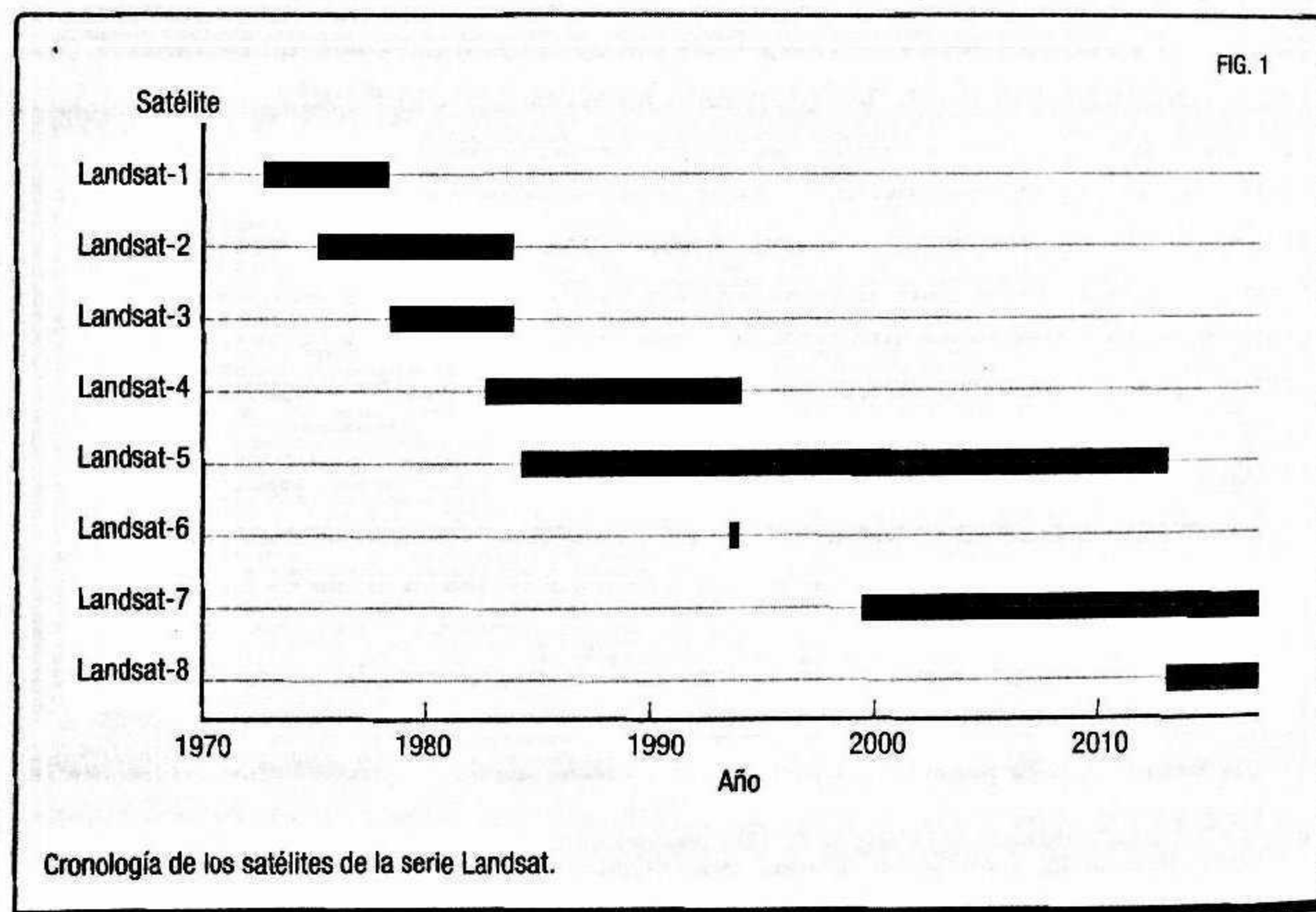
El programa estadounidense Landsat es un buen ejemplo de la forma en que la teledetección desde el espacio ayuda a tomar



Arriba, dos imágenes de Baton Rouge (Luisiana, EE. UU.), una tomada en luz visible (izquierda) y otra en infrarrojo térmico (derecha). La banda oscura a la izquierda de ambas imágenes es el río Misisipi. Abajo, el satélite Landsat-8 sobrevolando la Tierra.

decisiones informadas en tierra (figura 1). El primero de la serie de estos satélites destinados a la observación en alta resolución de la superficie terrestre, el Landsat-1, fue puesto en órbita en 1972 y funcionó durante casi seis años. Los instrumentos de observación que llevó se limitaron a dos: una cámara fotográfica y un sistema de barrido multiespectral (MSS). La cámara era sensible a toda la luz visible y el infrarrojo cercano, lo que permitía obtener fotografías desde el espacio, pero el instrumento MSS se reveló como el más útil debido a que sus cuatro bandas de frecuencia (correspondientes a los colores verde, rojo y dos bandas del infrarrojo cercano) respondían de forma diferente según las características del terreno. Tuvo tanto éxito que llegó incluso a descubrir una pequeña isla frente a la península de Labrador, en Canadá, bautizada posteriormente como «isla Landsat».

El Landsat-1, inicialmente pensado como un satélite único, acabó siendo el primero de una serie. Pronto se descubrió que la cámara era mucho menos útil que el sistema multiespectral,



así que este fue potenciado y el Landsat-3 incluyó un sensor adicional en infrarrojo (que desafortunadamente falló al poco de ser puesto en órbita). Los siguientes, Landsat-4 y 5, eliminaron por completo la cámara e incorporaron un nuevo escáner multiespectral avanzado sensible en la región del infrarrojo térmico, es decir, podía detectar cuerpos a la temperatura ambiente de la superficie terrestre. El número de bandas de frecuencia que se observaban aumentó y, con ello, la calidad de las imágenes.

En contraste con el éxito del Landsat-5, que con 28 años de funcionamiento (hasta su retiro en 2013) ostenta el récord de ser el satélite de observación terrestre más longevo, su sucesor Landsat-6 resultó una decepción, ya que falló durante el lanzamiento; pero los Landsat-7 y 8 (véase la imagen inferior de la pág. 19), que siguen activos a día de hoy, continúan barriendo la superficie terrestre, generando imágenes multiespectrales con una resolución de quince metros en luz visible.

Al contrario que otros sistemas de satélites, gestionados y operados por la NASA (siglas en inglés de Agencia Nacional de la Aeronáutica y del Espacio), la responsabilidad de los Landsat se transfirió en 1979 a la Agencia Nacional Oceánica y Atmosférica estadounidense (NOAA) y, desde entonces, los datos obtenidos se comercializan, aunque en algunos casos, se ofrecen de forma gratuita. De ese modo, cualquier entidad interesada, sea una ciudad, una empresa o un gobierno, puede acceder a un amplio catálogo de imágenes en múltiples bandas de frecuencia y a lo largo de casi cuarenta años de historia, lo que entre otras cosas permite:

- Analizar las condiciones en las que los cultivos crecen en los campos para ajustar la cantidad de agua y fertilizantes necesarios, rotar cultivos y tomar medidas frente a sequías o fuertes lluvias.
- Evaluar el estado de los diferentes ecosistemas y su biodiversidad, incluyendo parámetros como la densidad de la vegetación o la acción de plagas de insectos.
- Colaborar, junto con otras plataformas espaciales, en el estudio de la acción de desastres naturales como huracanes, incendios forestales, inundaciones y erupciones vol-

cánicas; incluyendo tareas de prevención de riesgos y de recuperación post-desastre.

- Proporcionar datos para ayudar en la gestión de bosques y en la prevención de la deforestación incontrolada de las regiones selváticas.
- Planificar estrategias para atenuar el impacto del cambio climático inducido por las actividades humanas.
- Determinar el impacto de problemas sanitarios a gran escala como la malaria o la malnutrición.
- Calibrar el impacto social y medioambiental de las actividades mineras.
- Realizar tareas de planificación urbana y gestión del terreno.

Desde hace años los ciudadanos pueden utilizar directamente las imágenes de teledetección para usos que van de la planificación de rutas a la búsqueda de hoteles. Google Maps, una de las más conocidas, utiliza mapas basados en imágenes obtenidas por satélites como Landsat-7 y es capaz de combinar información geográfica, meteorológica, fotográfica y de tráfico. En la actualidad el uso de imágenes de satélite es tan habitual como el de los satélites GPS para localización precisa, y es la base de nuevos modelos de negocio con un gran impacto económico.

RASTREANDO LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Que las actividades humanas transforman el paisaje, en ocasiones a gran escala, es algo bien sabido, pero solo en las últimas décadas hemos sido conscientes del impacto global que la especie humana causa en nuestro planeta. La presión ha aumentado de la mano del crecimiento económico y los problemas asociados a la destrucción de ecosistemas o el agotamiento de recursos traspasan fronteras y se vuelven multinacionales.

Las interacciones que dan lugar al cambio climático son complejas y están fuertemente influidas por multitud de factores, de modo que raramente pueden entenderse estudiando

sus causas por separado. Un aumento global de la temperatura, por ejemplo, provocará un mayor influjo de agua dulce al mar debido a las precipitaciones y a la fusión de los glaciares; esto, a su vez, influirá negativamente en los patrones de circulación del agua de los océanos, con el resultado de que las temperaturas en el Atlántico Norte y el continente europeo caerían drásticamente.

Es imposible formarse una imagen del cambio climático de nuestro planeta sin estudiar a fondo los tres elementos fundamentales que lo dirigen: energía, gases y aerosoles.

La energía proviene del Sol y, aunque es bastante estable en el tiempo, sufre fluctuaciones debido a las manchas solares. Ocho minutos después de abandonar la superficie solar, la energía llega a la Tierra (principalmente en forma de luz visible), interactúa con el terreno, el agua y el aire, y parte de ella vuelve al espacio en forma de radiación infrarroja.

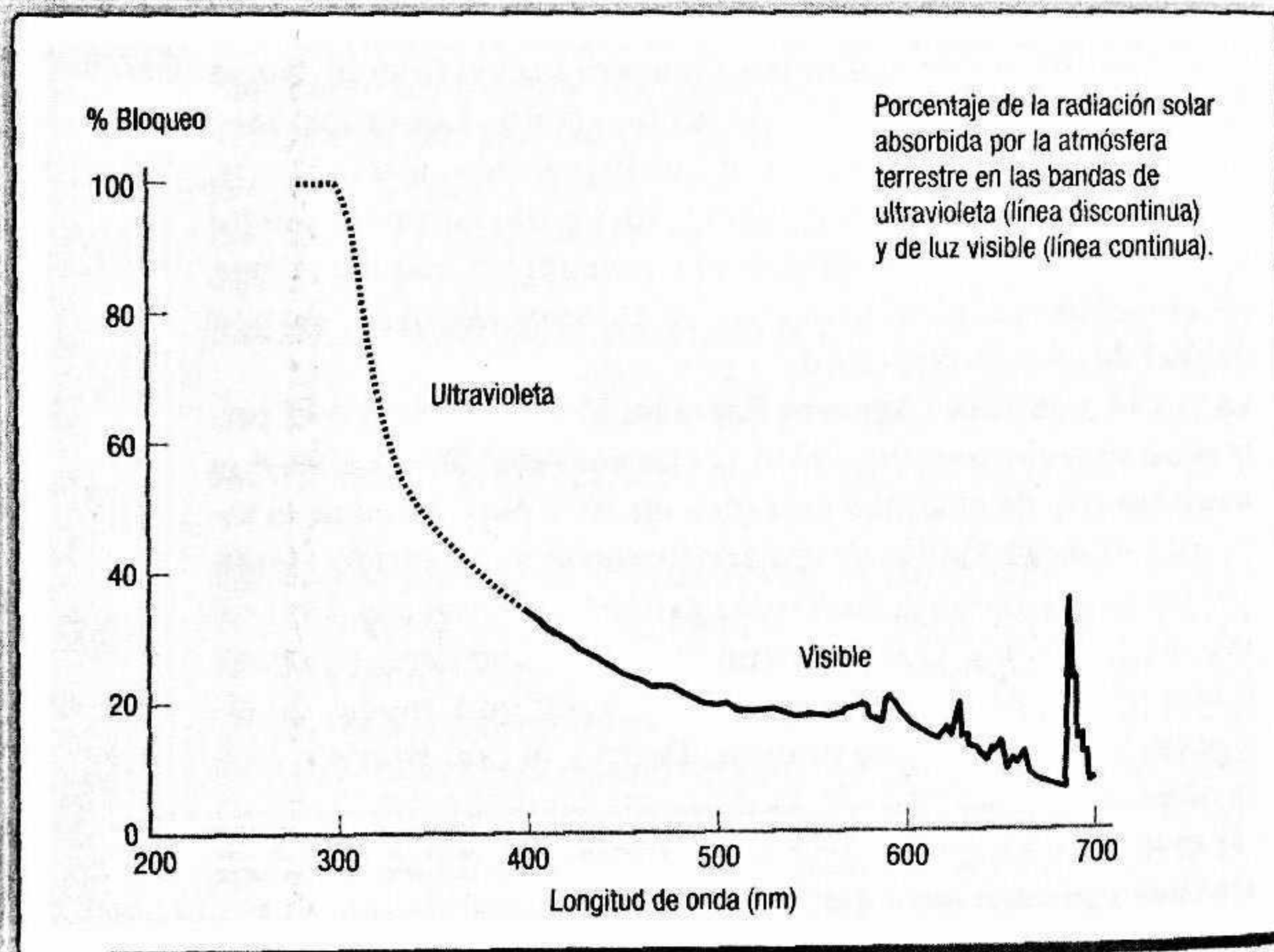
Los efectos de la energía solar sobre la Tierra son críticos para nuestro bienestar, y aun para nuestra supervivencia. No se trata solamente de la cantidad de luz que emite. Las erupciones de masa coronal pueden afectar a los dispositivos electrónicos, interrumpir el suministro eléctrico y, en un día particularmente malo, acabar con nuestra civilización tecnológica. Esto hace que la observación del Sol en todos sus detalles sea algo más que una actividad de interés científico.

La NASA y la ESA (Agencia Espacial Europea) dieron el primer paso con el programa ISEE (*International Sun-Earth Explorer*), un trío de satélites lanzados en 1977 para estudiar la interacción entre el campo magnético terrestre y el llamado *viento solar*, un tenue flujo de partículas procedentes del Sol. Dos de las naves (ISEE-1 y 2) se situaron en órbita terrestre, mientras que una tercera (ISEE-3) se adelantó un millón y medio de kilómetros, interponiéndose entre la Tierra y el Sol. Durante casi diez años permanecieron de guardia, midiendo las condiciones de la magnetosfera terrestre y examinando los movimientos de partículas y plasma del espacio.

En 1994 la NASA envió la sonda WIND al mismo lugar de patrulla de la ISEE-3, y tanto esta agencia espacial como otras con-

LA DESTRUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO

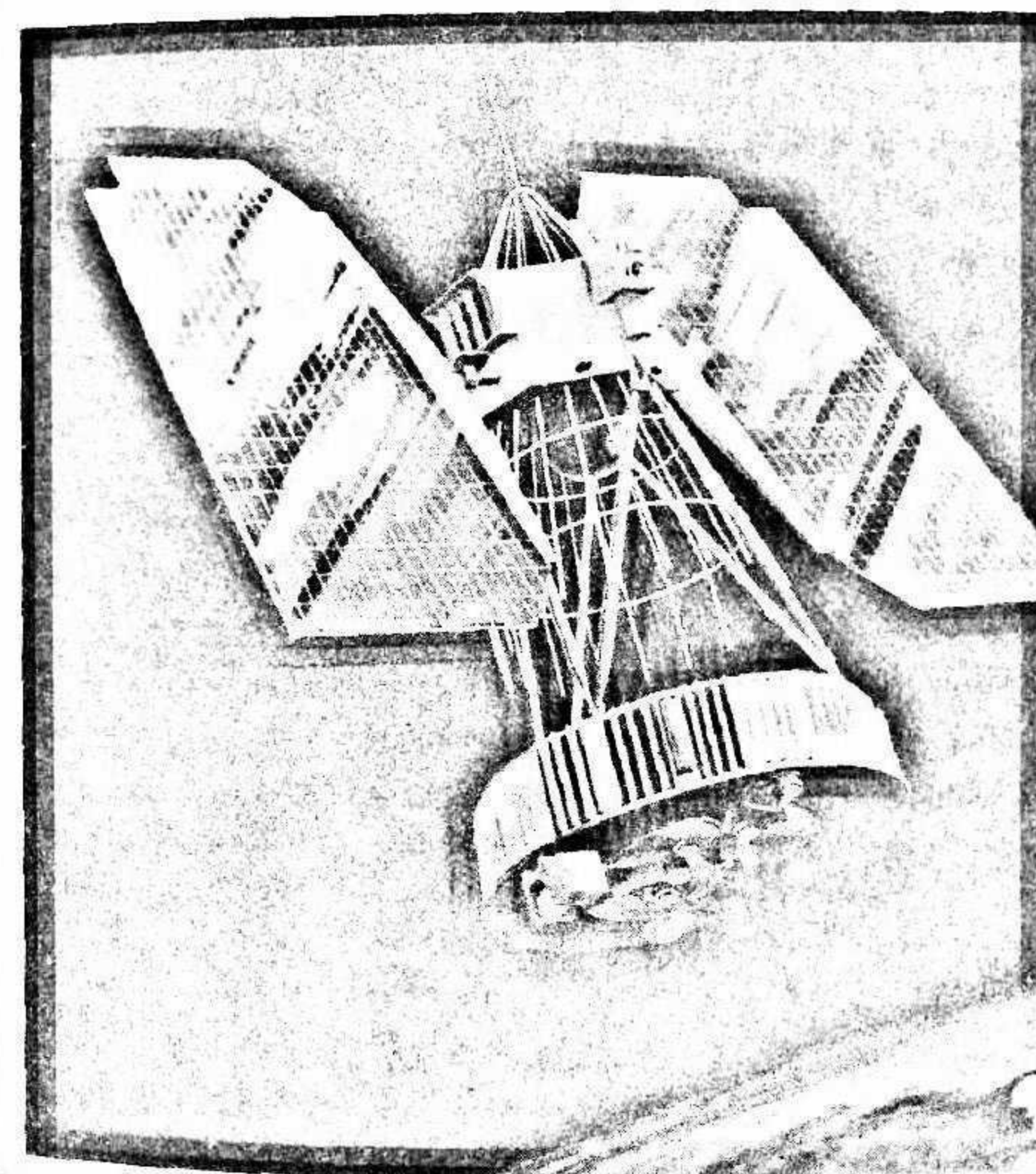
Por encima de la altitud típica de los aviones comerciales, la atmósfera terrestre contiene un gas que nos protege de parte de la luz ultravioleta del Sol: el ozono (véase radiación solar absorbida en la figura). Se extiende en una capa muy gruesa (más de cuarenta kilómetros) pero a esa altura se encuentra tan enrarecido que, si estuviera a la presión atmosférica, su grosor sería inferior a medio milímetro. En 1978 los investigadores estadounidenses Mario Molina y F. Sherwood Rowland publicaron una teoría según la cual algunos compuestos clorofluorocarbonados (CFC) liberan cloro cuando son alcanzados por rayos ultravioleta, cloro que posteriormente destruye gran cantidad de moléculas de ozono. Los CFC son partículas con larga vida, inertes e insolubles en agua, cualidades valiosas en aplicaciones industriales como refrigerantes pero perjudiciales para la capa de ozono por esos mismos motivos. Resulta especialmente perjudicial la reducción de ozono en las regiones antárticas (el llamado «agujero de ozono»), que se une a una reducción natural durante los meses del verano austral, y por ese motivo los niveles de ozono sobre la Antártida fueron medidos con especial precaución por un equipo británico sobre el terreno en los años setenta. Cuando el satélite meteorológico Nimbus 7 (en la imagen) intentó confirmar el descubrimiento, encontró en efecto una caída de un discreto 10 % en el contenido de la capa de ozono. En realidad la cifra era aún mayor pero los científicos de



la NASA no lo sabían. Nadie creía que pudiese darse una reducción tan grande en la capa de ozono, así que en principio se atribuyó a un error en las mediciones.

No era un error

Cuando los científicos se apercibieron de lo que realmente sucedía, descubrieron que la reducción de ozono alcanzaba casi el 40 %. Las medidas del Nimbus 7 ayudaron a extender la imagen de una capa de ozono frágil y en proceso de destrucción a causa de la acción humana y en 1989 entró en vigor el Protocolo de Montreal que prohíbe el uso de CFC y otros gases perjudiciales para la capa de ozono. Los gases CFC ya presentes en la atmósfera permanecerán estables durante décadas y la capa de ozono no volverá a niveles normales hasta 2070, pero sin ese protocolo hubiera sido mucho peor. En 1995 Molina y Rowland, junto con el holandés Paul Crutzen, fueron premiados con el Nobel de Química «por su trabajo en química atmosférica, particularmente relativa a la formación y descomposición de ozono».



Los siete satélites meteorológicos de la serie Nimbus de la NASA fueron puestos en órbita entre 1964 y 1978 para recoger datos científicos de la atmósfera terrestre.

tinuaron la labor de vigilancia solar. La lista de dispositivos espaciales que ejercen como vigilantes del Sol constituye en sí una declaración del grado en que los seres humanos se preocupan por la estabilidad de la estrella bajo la que viven:

- SMS (NASA) estudió el Sol en longitudes de onda de ultravioleta, rayos X y gamma, en una época de fuerte actividad solar.
- Ulysses (NASA/ESA) se valió del campo gravitatorio de Júpiter para elevarse por encima del plano de la eclíptica (plano en que orbitan el Sol y los planetas) y observar el Sol por sus polos norte y sur, algo nunca hecho antes.
- GEOTAIL (Japón) estudió la magnetosfera solar.
- SOHO (NASA/ESA) examinó la estructura interna del Sol y su extensa atmósfera.
- TRACE (NASA) proporcionó detalles precisos sobre la corona solar.
- Cluster (NASA/ESA) y Double Star (ESA/China) se desplegaron para investigar la interacción entre el viento solar y el campo magnético terrestre.
- Genesis (NASA) recuperó muestras del viento solar para su análisis.
- HESSI (NASA) vigila el Sol en busca de llamaradas solares.
- Stereo (NASA), gracias a sus dos sondas, proporciona una visión estereoscópica de las eyecciones de masa coronal.

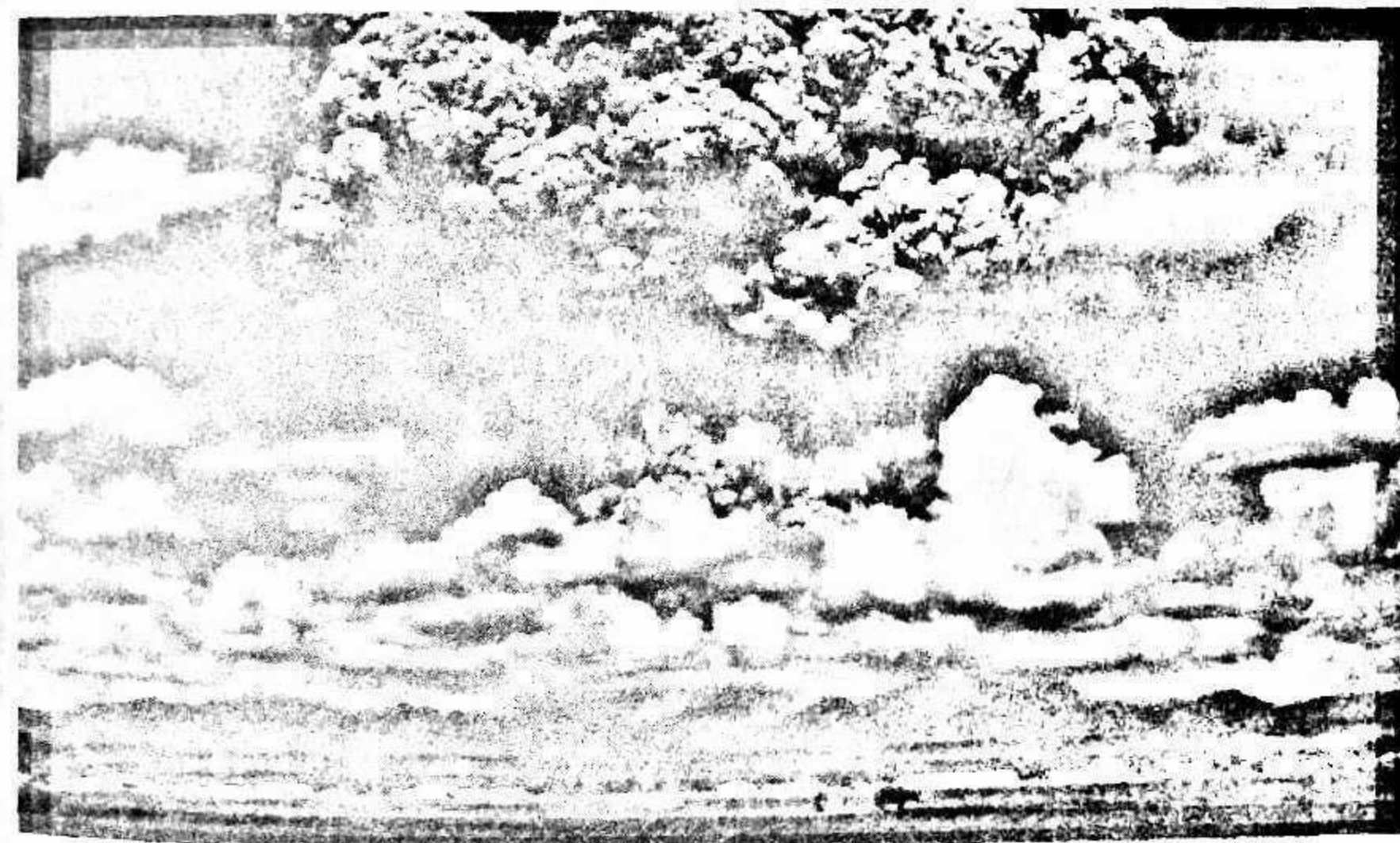
Los gases como el dióxido de carbono y el metano suelen conocerse como «gases de efecto invernadero» porque actúan de forma análoga a los cristales de un invernadero, frenando la emisión de luz infrarroja y calentando la superficie. El dióxido de carbono se encuentra presente en la atmósfera terrestre de modo natural y, sin su presencia, la temperatura media de la Tierra sería de -20°C . Las actividades antropogénicas han aumentado la cantidad de CO_2 en la atmósfera en casi un 50%, y el calentamiento extra resultante incrementa la cantidad de energía puesta en juego en fenómenos meteorológicos como huracanes y tornados, aumentando la severidad de las sequías e inundacio-

LAS CONSECUENCIAS DEL AZUFRE ATMOSFÉRICO

El volcán Pinatubo, en Filipinas (en la fotografía), lanzó varios millones de toneladas de óxido de azufre a la atmósfera durante su gran erupción de 1991, reduciendo la temperatura global de la Tierra en medio grado. Durante dos años el enfriamiento fue de tal magnitud que contrarrestó temporalmente los efectos del calentamiento climático global. No fue la única vez. El volcán Krakatoa provocó un periodo de temperaturas anormalmente bajas en 1883, Tambora dio lugar al llamado «año sin verano» de 1816 y el historiador Plutarco escribió en el año 44 a.C. que «el disco solar salió pálido y privado de rayos... y los frutos se quedaron imperfectos y sin madurar por la frialdad del ambiente», tras la erupción del volcán Etna. La emisión a la atmósfera de grandes cantidades de óxido de azufre hace que esta refleje parte de la luz solar de vuelta al espacio.

Una combinación peligrosa

Cuando las naciones industrializadas comenzaron a atajar los problemas de contaminación urbana, una de las medidas que se tomaron fue la reducción en la emisión de óxidos de nitrógeno y azufre, que al combinarse forman la llamada *lluvia ácida*. Un conjunto de leyes y tratados internacionales intentan desde entonces limitar estas emisiones de gases, pero surgió un efecto inesperado: al eliminar los óxidos de azufre de la atmósfera, las ciudades reciben algo más de luz solar, y como consecuencia su temperatura aumenta levemente, contribuyendo al efecto de isla de calor.

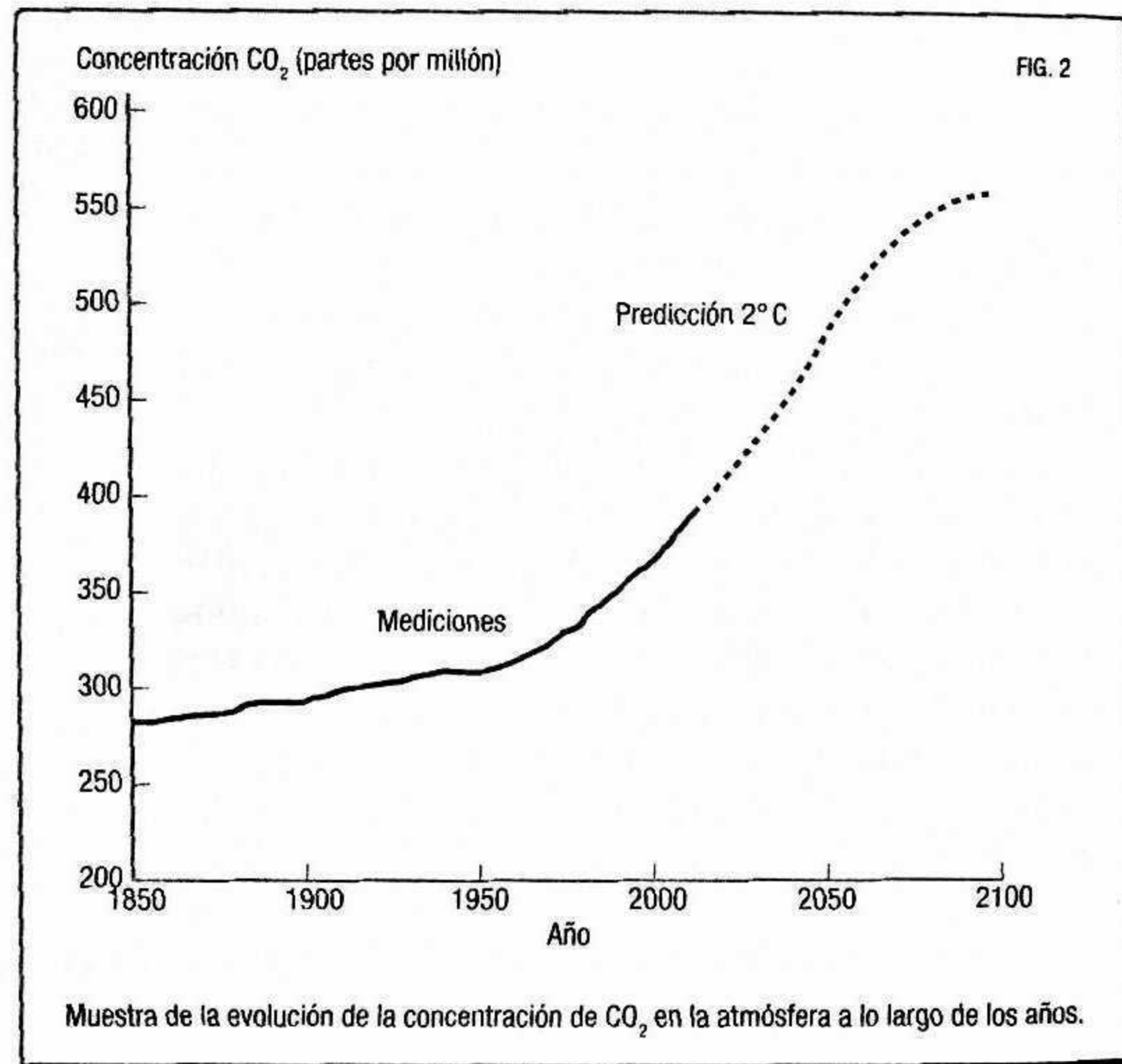


Las erupciones de los volcanes, como la del Pinatubo del 12 de junio de 1991, son potentes fuentes naturales de emisión de azufre a la atmósfera.

nes, y contribuyendo, en general, a que la variabilidad climática sea más extrema.

El estudio de las concentraciones de CO_2 en la atmósfera (véase figura 2) puede realizarse mediante observatorios en tierra, pero solo desde la órbita terrestre se puede tener una visión global de la distribución de ese gas en las diversas regiones de la Tierra, a varias alturas y de forma constante. La clave consiste en medir la «huella» óptica que deja el CO_2 al interactuar con la luz incidente del Sol.

Para conseguirlo, la NASA construyó el satélite OCO (*Orbiting Carbon Observatory*). A bordo iba un solo instrumento, un espectrómetro de alta resolución sensible a tres longitudes de onda en el infrarrojo cercano que son absorbidas por las moléculas de dióxido de carbono y de oxígeno. Midiendo cuidadosa-



mente la luz absorbida por esas sustancias se puede determinar su ubicación y concentración.

Se esperaba que OCO contribuyese de manera significativa a la comprensión de la dinámica del CO_2 global, pero un fallo durante el lanzamiento en 2009 le impidió cumplir su misión. Su sustituto, OCO-2, fue puesto en órbita en 2014 y, para reemplazarlo cuando falle, la NASA aprovechó sus piezas de repuesto y construyó el OCO-3, que no es un satélite autónomo sino un módulo que será instalado en la Estación Espacial Internacional (EEI). El satélite japonés GOSAT, lanzado un mes antes que OCO, no solo mide las concentraciones de dióxido de carbono sino también las de metano, otro gas de efecto invernadero. Estas plataformas espaciales ayudarán a aclarar algunas de las incógnitas del efecto invernadero, en particular el problema de los sumideros. Según parece, la mitad del CO_2 emitido por actividades humanas no se queda en la atmósfera. ¿Dónde va a parar? No se sabe todavía.

Los aerosoles son partículas muy pequeñas (inferiores a una milésima de milímetro) suspendidas en el aire, como polvo y humo. Algunos aerosoles son producidos de forma natural por la naturaleza, como erupciones volcánicas o episodios de calima (polvo del desierto), en tanto que otros son generados por el hombre, fundamentalmente a partir de la combustión de materias fósiles. Los efectos de los aerosoles en el clima son diversos, ya que algunos tienden a reflejar luz y provocar una disminución de la temperatura, en tanto que otros hacen justo lo contrario.

La detección de los aerosoles es algo diferente a la de gases de invernadero, ya que se trata de partículas mucho mayores que una molécula y pueden tener una composición muy diversa, sean silicatos de una erupción volcánica, cristales salinos del océano o residuos de la combustión. Los métodos varían, pero suelen basarse en el mismo principio: observar la luz dispersada por las partículas de aerosol.

Es habitual que los instrumentos detectores de aerosoles formen parte de un satélite que mida otros parámetros de interés climático, como la concentración de vapor de agua o la distribución de nubes. Como ejemplo, el satélite Aura, además de me-

dir aerosoles, puede detectar asimismo la presencia de gases de efecto invernadero, medir los niveles de ozono, vapor de agua y otros gases, y también proporcionar mapas de alta resolución.

Una mejora respecto a los métodos de observación basados en la dispersión de la luz solar consiste en crear iluminación a medida por medio de un láser de longitud de onda, intensidad y polarización conocidas. Suelen trabajar en varias longitudes de onda para mejorar la eficacia en la caracterización de los aerosoles y, aunque se emplean sobre todo en estaciones de tierra, también hay algunos en órbita, como el instrumento CATS (*Cloud-Aerosol Transport System*), que desde enero de 2015 proporciona perfiles de aerosoles y nubes a bordo de la Estación Espacial Internacional.

METEOROLOGÍA: LA COMPLEJA FÍSICA DE LA ATMÓSFERA

La predicción del tiempo es una actividad tan antigua como vital para la supervivencia de las civilizaciones humanas. Saber qué pasará en la siguiente estación permite planificar los periodos agrícolas y ganaderos, y la predicción meteorológica se convirtió en una tarea de interés para los gobiernos, cuya importancia se mantiene a día de hoy.

Con el advenimiento y desarrollo de la ciencia, los adivinos y chamanes dieron paso a los pronosticadores científicos. Antes incluso de que naciesen los Estados Unidos, el científico y político Benjamin Franklin publicaba el *Almanaque del pobre Richard*, que incluía predicciones meteorológicas. Un siglo después, en 1850, el astrólogo español Mariano Castillo y Ocsiero comenzó la publicación del famoso *Calendario Zaragozano*, tan popular entre los hombres del campo que ha pervivido hasta el día de hoy. Por supuesto, las predicciones meteorológicas que contiene carecen de validez científica, cosa que reconocen los propios editores y, sin duda, la forma más eficaz de conocer el tiempo que hará mañana es acudir a las agencias oficiales de meteorología como la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) española o la NOAA norteamericana.

CIENCIA CAÓTICA

Estamos acostumbrados a que una variación muy pequeña en el estado inicial de un sistema apenas tenga repercusión en el resultado. Cuando tiramos dos monedas al suelo desde la misma altura, esperamos que caigan en el mismo lugar al mismo tiempo. Hay sistemas que, por el contrario, son altamente sensibles a las condiciones iniciales; la rama de las matemáticas que se ocupa de su estudio recibe el nombre de teoría del caos. En la actualidad la teoría del caos tiene aplicaciones en gran número de campos, de la biología a la economía, y en todos ellos ha de asumirse que el futuro es inherentemente incierto.

El efecto mariposa de Lorenz

Uno de los matemáticos que pusieron de moda la teoría del caos fue Edward Norton Lorenz. En 1961, mientras realizaba simulaciones de modelos meteorológicos por ordenador, Lorenz descubrió que un pequeño error de redondeo en una variable numérica producía una predicción totalmente distinta a la original. Una mariposa aleteando en un rincón del mundo puede producir una tempestad en la otra punta del planeta. Los modelos climáticos son capaces de reproducir tendencias a largo plazo derivadas de, por ejemplo, un aumento en los niveles de CO₂, pero es imposible obtener detalles fiables del tiempo en un lugar concreto más allá de una semana. El tiempo meteorológico es un ejemplo clásico de fenómeno caótico, una sensación muy bien representada en el cuadro de Bierstadt.



El cuadro *Tormenta en las Montañas*, del pintor estadounidense Albert Bierstadt (1830-1902), muestra esa sensación de caos meteorológico.

¿Puede el aleteo de una mariposa en Brasil desencadenar un tornado en Texas?

EDWARD LORENZ

Dos han sido tradicionalmente las dificultades para conocer el tiempo futuro. La primera es de índole computacional. Aunque las ecuaciones que rigen los fenómenos climáticos son sencillas en su descripción, deben ser resueltas para una enorme cantidad de lugares e instantes de tiempo; además, la atmósfe-

ra es un sistema caótico, lo que significa que una mínima variación en las condiciones iniciales (por ejemplo, si la temperatura en Oviedo es hoy de 15,001 grados en lugar de 15) influye notablemente en las predicciones.

Lo que nos lleva al segundo problema: la obtención de datos experimentales precisos. No se puede predecir el tiempo sin conocer las condiciones iniciales de presión, temperatura, humedad y otras variables tanto en la región de interés como en las zonas circundantes; de hecho, en todo el planeta. Eso significa que la predicción del tiempo, aunque de carácter local, debe efectuarse a escala global, a diversas alturas de la atmósfera, de forma rápida y fiable.

Las capacidades de los satélites meteorológicos han aumentado con los años. El primero de ellos, el norteamericano TIROS-1, fue lanzado en abril de 1960 y operó con dos sencillas cámaras fotográficas durante 78 días. Los satélites de la serie MSG (Meteosat Segunda Generación) disponen de dos medidores de radiación solar en luz visible e infrarrojos, así como de un sistema de imágenes multicanal capaz de facilitar información sobre características tanto de las capas nubosas como de la superficie (zonas sometidas a incendios forestales, concentraciones de vegetación, de nieve, hielo, humedad, biomasa) y del aire (contenido de vapor de agua, cenizas volcánicas, viento, precipitaciones, ozono); pueden incluso participar en programas de búsqueda y rescate coordinando el envío de mensajes de socorro.

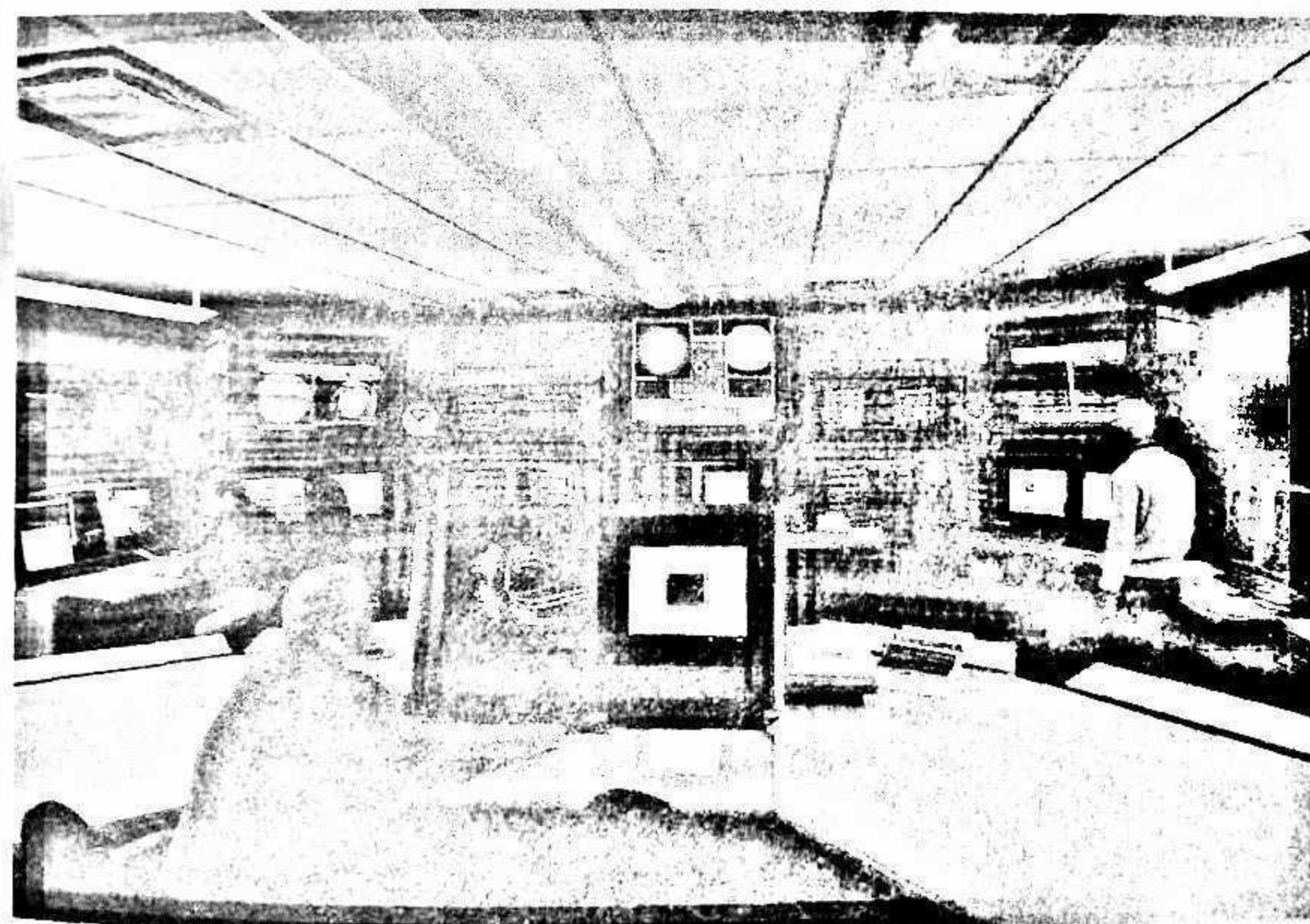
Durante el siglo xx la aplicación de las leyes de la física a las masas de agua y aire permitió una predicción del tiempo cada vez más precisa. En nuestros días se puede conocer el estado

METEOROLOGÍA ESPACIAL: EL TIEMPO «AHÍ AFUERA»

GOES-16, el más reciente satélite meteorológico de la agencia estadounidense NOAA (en la imagen, el centro de predicción de la agencia), representa un paso más allá de lo que habitualmente se entiende por estudio del tiempo. Entre sus instrumentos se encuentra un sistema de imagen ultravioleta, un magnetómetro y sensores de rayos X y gamma; y no se apuntan hacia la superficie terrestre sino hacia el espacio. Su objetivo es controlar el «tiempo espacial». Cuando las partículas que forman el viento solar se acercan a la Tierra, nuestra magnetosfera las desvía y nos protege de ellas.

Amenazadores vientos solares

En 1989 la región canadiense en torno a Quebec se quedó sin electricidad debido a las interacciones del viento solar con la magnetosfera terrestre. Una tormenta de viento solar extrema puede destruir las redes de comunicaciones y de transporte de energía. Para estar prevenidos, GOES-16 dispone de instrumentos para escudriñar el espacio entre la Tierra y el Sol, y dar la alarma en caso necesario. La condición de aviso, que puede consultarse en www.swpc.noaa.gov, muestra en el momento de escribir estas líneas que todo está tranquilo, salvo por un moderado impacto en las comunicaciones de radio. También España tiene su sistema de alerta, llamado SeNMEs (Servicio Nacional de Meteorología Espacial).



Centro de predicción de tiempo espacial de la NOAA en Boulder, (Colorado).

del tiempo con tres días de antelación, conocer tendencias a 7-10 días y establecer tendencias más genéricas a uno o dos meses vista. La información proporcionada por los satélites meteorológicos es un paso imprescindible previo a la predicción mediante modelos informáticos avanzados, y es lo que permite que en la actualidad podamos saber qué tiempo hará mañana de forma sencilla y rutinaria.

FATALES Y A MENUDO IMPREVISIBLES: LOS DESASTRES NATURALES

Aunque los satélites meteorológicos complementan el trabajo de las estaciones en tierra para el seguimiento de huracanes y ciclones, permitiendo estimar su trayectoria y establecer medidas de prevención y evacuación, la predicción de estos fenómenos sigue siendo tarea mejorable. La destrucción provocada por el huracán Katrina (véase la fotografía superior de la página siguiente) en agosto de 2005 fue un recordatorio de que todavía había mucho que mejorar y, aunque la precisión en la predicción de la trayectoria de un huracán ha aumentado sensiblemente, existen otros parámetros donde se ha avanzado poco. Resulta de particular importancia conocer la velocidad de los vientos superficiales en el ojo para poder estimar la fuerza destructiva de un huracán y su proceso de intensificación.

En los últimos veinte años se ha desarrollado una técnica llamada *dispersometría*, consistente en estudiar las ondas de radio reflejadas por la superficie del océano para deducir la velocidad del viento sobre el mar. Tras una serie de pruebas previas, en diciembre de 2016 la NASA dio un paso decisivo con la puesta en órbita de CYGNSS (por *Cyclone Global Navigation Satellite System*), un sistema de ocho microsátélites de apenas medio metro de longitud y 30 kilogramos de masa cada uno. Su pequeño tamaño se consiguió gracias a que, en lugar de tener emisores de ondas de radio propias, utilizan las señales del sistema de localización por satélite GPS.



La distancia permite apreciar mejor la magnitud de los desastres naturales (arriba, imagen de Nueva Orleans tras el paso del huracán Katrina en 2005) así como la de ciertos rastros que el hombre ha dejado en la superficie terrestre (abajo, las líneas de Nazca, en Perú).

He descubierto pirámides desde el espacio. ¿Puede haber algo más genial que eso?

SARAH PARCAK

La órbita baja permite sondear nuestro planeta de muchas formas para recabar información; por ejemplo, analizando su gravedad. Aunque la Tierra puede considerarse como una esfera homogénea a efectos de calcular su movimiento alrededor del Sol, dista mucho de serlo. Las concentraciones locales de masa inducen pequeñas diferencias entre el campo gravitatorio en diversas zonas del mundo, lo que permite detectar depósitos de minerales y campos petrolíferos.

La gravimetría de precisión puede realizarse desde el espacio. La clave consiste en observar las pequeñas variaciones de altitud en la órbita de un satélite, que tenderá a acercarse a la superficie terrestre cuando pase cerca de una zona masiva como una cordillera y a alejarse cuando se encuentre sobre el mar. Con ese fin, la NASA y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR, *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.*) lanzaron en 2002 la misión GRACE (por *Gravity Recovery And Climate Experiment*), consistente en una pareja de satélites cuyo movimiento a lo largo de la órbita permitió cartografiar el campo gravitatorio de la Tierra con gran precisión; otra sonda llamada GOCE (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*), de la ESA, realizó tareas similares entre 2009 y 2013.

La utilidad de tener un mapa gravimétrico de la superficie terrestre es de indudable valor para los geofísicos, que pueden seguir las variaciones debidas a movimientos subterráneos de magma o delimitar la extensión de las cadenas montañosas, ¿pero qué aplicaciones tiene en meteorología o prevención de desastres naturales? Resulta que los satélites gravimétricos han resultado ser tan precisos que pueden detectar fenómenos tales como el cambio en el grosor de las capas de hielo, los procesos de circulación oceánica, el paso de huracanes o el movimiento de las placas tectónicas debido a un terremoto.

Los sondeos de GRACE han permitido determinar que al menos un tercio de los grandes acuíferos subterráneos de la

Tierra están sobreexplotados más allá de sus posibilidades de regeneración actual. Algunos de ellos se encuentran en regiones muy secas y son fuertemente explotados como principal recurso hídrico; tal es el caso de la región India/Pakistán, el desierto de Arabia, el nordeste del Sahara y algunas zonas de California. Otras zonas, aun con precipitaciones abundantes, son incapaces de regenerar sus acuíferos a la velocidad suficiente, como el norte de Francia, la costa atlántica meridional de EE. UU., el este de China y casi toda Rusia hasta el oeste de los Urales.

Dicen que en el espacio nadie puede oír tus gritos, lo que es físicamente correcto ya que el sonido precisa de un soporte material como el aire para transmitirse; los satélites gravimétricos pueden en principio detectarlos debido a que se mueven en una órbita donde la atmósfera está muy enrarecida pero aún está presente. Como prueba de ello, en marzo de 2011 el terremoto de Tohoku (Japón) que provocó el desastre nuclear de Fukushima generó un sonido tan fuerte que sus ondas de baja frecuencia fueron captadas por el satélite GOCE, el cual se convirtió así en el primer sismómetro orbital de la historia.

ARQUEOLOGÍA DESDE EL ESPACIO

Las perturbaciones producidas por el hombre sobre el paisaje pueden detectarse fácilmente desde el espacio. Más difícil, pero asimismo posible, es observar el resultado de la actividad de tiempos pasados. Las famosas figuras de Nazca (ver imagen inferior de página 35), en Perú, son un ejemplo palpable, y hasta tal punto parecen haber sido construidas para verse desde el aire que constituyen una de las «pruebas» favoritas para charlatanes y conspiranoicos que pretenden ver una mano extraterrestre en la construcción de grandes obras de ingeniería en la antigüedad.

Las ruinas de ciudades olvidadas pueden resultar visibles para un satélite, ya que los restos reflejan de forma distinta la luz infrarroja, incluso en el caso de que estén enterrados a poca profundidad. Un láser a bordo de un satélite, usado

como telémetro de precisión, permite desvelar elevaciones del terreno imperceptibles desde la superficie que pueden señalar la presencia de restos enterrados. El uso de radares de apertura sintética (SAR) permite asimismo profundizar bajo tierra.

Las aplicaciones de la observación espacial en arqueología han encontrado un campo particularmente fértil en zonas selváticas, donde la dificultad de acceder al terreno dificulta el trabajo de los arqueólogos. En los años ochenta el arqueólogo estadounidense Payson Sheets utilizó imágenes en infrarrojo, lidar y radar para encontrar caminos ocultos en la selva de Costa Rica, revelando la existencia de un pueblo antiguo seminómada, con asentamientos que eran abandonados cada vez que el volcán cercano entraba en erupción.

La arqueología desde el espacio ha sido popularizada en años recientes por la estadounidense Sarah Parcak, que se ha convertido en una figura mediática. Su equipo afirma haber encontrado más de una docena de pirámides en Egipto, así como otros descubrimientos relativos a los antiguos vikingos y al Imperio romano. Algunos arqueólogos tradicionales han sido críticos con sus métodos pero, como la propia Parcak afirma, las imágenes por satélites son tan solo una herramienta. Eso sí, una herramienta poderosa, y en expansión. GlobalXplore, una iniciativa reciente de ciencia ciudadana, permite a cualquier voluntario colaborar desde su propia casa, examinando imágenes por satélites en busca de restos arqueológicos en Perú y otros lugares.

La arqueología desde el espacio no debe confundirse con otro tipo de arqueología «del» espacio. Como toda actividad humana, la exploración espacial tiene también sus héroes de leyenda, sus ruinas y sus documentos perdidos. Parte de los archivos que contenían los datos enviados por sondas espaciales se encuentran en formatos obsoletos, y en diversas ocasiones ha habido necesidad de realizar auténticas tareas de reconstrucción arqueológica.

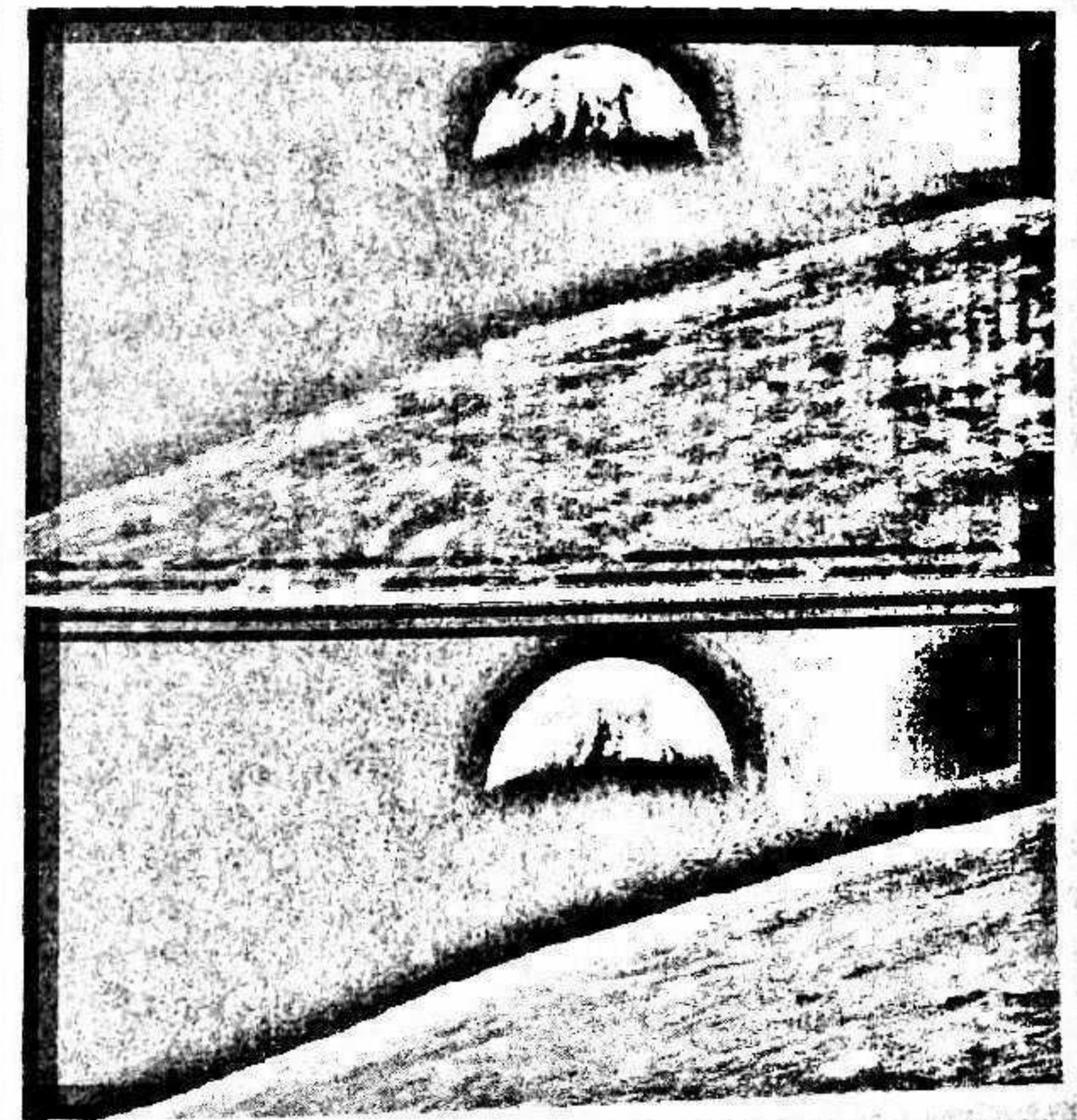
En la actualidad la NASA intenta salvaguardar el emplazamiento lunar del Apolo 11, donde los humanos se posaron por

LAS IMÁGENES PERDIDAS DE LA LUNA

Entre 1966 y 1967, cinco sondas del programa estadounidense Lunar Orbiter para el reconocimiento automático de la Luna fotografiaron cada palmo de la superficie lunar para ayudar a escoger los lugares de alunizaje adecuados para los astronautas del programa Apolo. Las imágenes se copiaron en cintas magnéticas, estas se almacenaron y fueron olvidadas durante años. Una archivera de la NASA llamada Nancy Evans intentó preservarlas, pero sus esfuerzos fueron inútiles frente a la inercia de la burocracia y las exigencias presupuestarias. A comienzos del siglo **xxi** la situación era desoladora: las cintas necesitaban máquinas lectoras especiales, y las únicas que se conservaban acumulaban polvo en casa de la propia Evans, entre trastos viejos y gallinas que picoteaban la basura.

El empeño de dos científicos entusiastas

Dos astrobiólogos estadounidenses, Dennis Wingo y Keith Cowing, fueron a por ellas, decididos a impedir que las fotos originales se perdiesen. El trabajo de reconstrucción que siguió fue una auténtica tarea de arqueología, pero finalmente se vio coronado por el éxito. Gracias a Evans, Wingo y Cowing la comunidad científica dispone ahora de un juego de fotografías lunares que rivaliza en precisión (y belleza) con las obtenidas por la sonda LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*) en 2008, y que permitirá evaluar cualquier cambio acaecido en la superficie lunar durante los últimos cincuenta años.



Fotografía de la Tierra apareciendo tras la luna en 1966 («Earthrise»). Foto original (arriba) y restaurada (abajo).

vez primera sobre nuestro satélite. Futuros arqueólogos lo considerarán como el equivalente al lugar de arribada de las naves de Colón y, aunque ni la NASA ni el Gobierno estadounidense tienen autoridad legal en la superficie lunar, la iniciativa muestra un esfuerzo encomiable por preservar el futuro, una especie de arqueología preventiva.

CAPÍTULO 2

Exploración del sistema solar

El envío de sondas no tripuladas a los planetas de nuestro sistema solar ha permitido conocerlos de una forma que no hubiera sido posible mediante observación terrestre. Viajemos a algunos de ellos, pues esconden datos cruciales para el bienestar del ser humano presente y futuro.

Empezaremos visitando Mercurio, un lugar de extremos. Como planeta más cercano al Sol tiene el año más corto de todos, de apenas 88 días. La duración de su día haría que un mercuriano pudiese ver salir el Sol solo una vez cada dos de sus años. Su diámetro y masa son los menores de todos los planetas, y su temperatura superficial es la segunda más alta. Al igual que Venus, carece de satélites y, debido a su cercanía al Sol, su atmósfera es inexistente.

La dificultad de observarlo lo ha convertido en un planeta misterioso. Los romanos lo bautizaron con el nombre de su dios mensajero al comprobar que se movía por la bóveda celeste más rápidamente que cualquiera de los otros planetas, pero su tamaño y su cercanía al Sol impiden una observación precisa. El célebre astrónomo Galileo Galilei (1564-1642), el primer hombre que enfocó un telescopio hacia Mercurio, no pudo observar siquiera el detalle de sus fases (similares a las de la Luna). Los astrónomos de siglos posteriores no tuvieron mucha más suerte, e incluso en los años sesenta, cuando el hombre puso el pie en la Luna por primera vez, no se sabía mucho más sobre Mercurio que tres mil años atrás. En nuestros días, el telescopio espacial

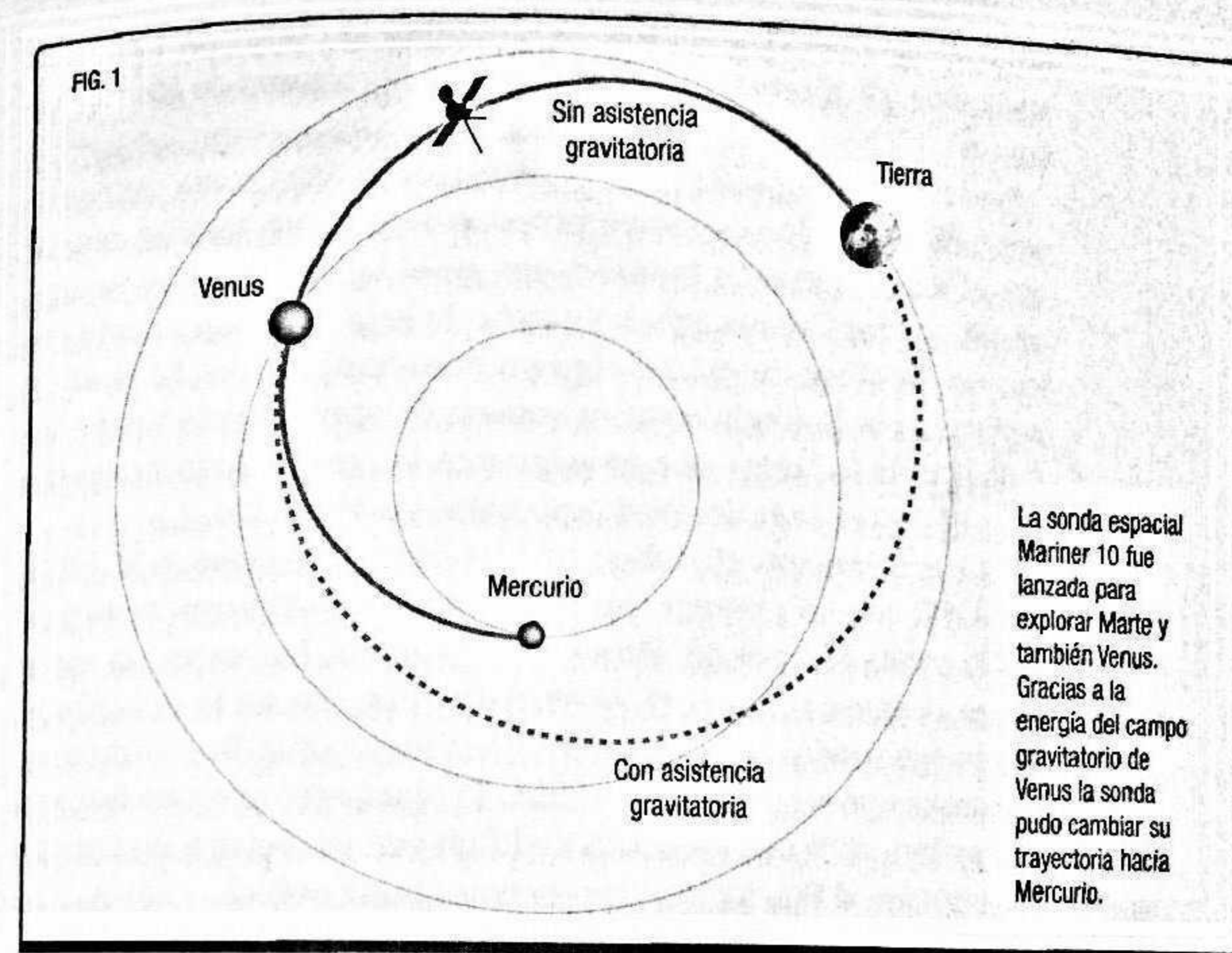
Hubble tiene vedada la observación de Mercurio para evitar que el Sol destruya sus sensibles instrumentos.

La exploración espacial parece la opción lógica, pero lanzar una nave hacia Mercurio es una tarea ardua. En las cercanías de su órbita la intensidad de la radiación solar es siete veces superior a la que llega a la superficie lunar, imponiendo requisitos técnicos muy exigentes para garantizar tanto la integridad de la sonda como las comunicaciones con tierra. Por otro lado, un objeto lanzado hacia el interior del sistema solar adquirirá una velocidad cada vez más alta, lo que conlleva un sobrevuelo muy breve y restringe enormemente las posibilidades de ponerlo en órbita mercuriana.

En los años setenta, el ser humano estuvo preparado para intentar la empresa. En noviembre de 1973 la NASA lanzó la Mariner 10, una sonda equipada con un radiómetro infrarrojo, un analizador de plasma y una cámara en luz visible que midieron la superficie, atmósfera y entorno mercurianos. Para evitar los problemas de un sobrevuelo rápido, la trayectoria de la sonda pasó primeramente cerca del planeta Venus en lo que se denomina una maniobra de asistencia gravitatoria. La Mariner 10 pasó así a describir una órbita elíptica (ver trayectoria en figura 1) que le llevó a las cercanías de Mercurio en tres ocasiones (marzo y septiembre de 1974, y marzo de 1975); como ventaja adicional, el propio Venus pudo ser observado durante el cambio de trayectoria en febrero de 1974.

La cercanía de los tres sobrevuelos (apenas 330 kilómetros de la superficie durante la máxima aproximación) permitió realizar fotografías de alta calidad de la superficie. El paisaje recuerda desde lejos al de la Luna: un cuerpo sin atmósfera, con una superficie carente de actividad geológica y tachonada de cráteres de impacto. La ausencia de atmósfera hace que las temperaturas superficiales sean muy distintas, con una cara iluminada soportando 190 °C mientras la cara oculta registra valores de -180 °C.

La Mariner 10 envió a la Tierra casi tres mil fotografías, pero apenas abarcaron la mitad de la superficie del planeta. También generó nuevas incógnitas, como el origen y naturaleza de su campo magnético. El magnetómetro de la Mariner 10 mostró la existencia de un débil campo magnético, lo que resultó



una sorpresa puesto que hasta entonces se creía que el lento giro de Mercurio sobre su eje le impediría crear campos magnéticos de intensidad apreciable.

Para resolver este y otros problemas, como la composición química de su superficie, hubo que esperar más de treinta años. Nuevamente hizo falta realizar un sobrevuelo múltiple para que la nueva sonda, llamada MESSENGER (un acrónimo de *MERcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry and Ranging*), llegase al planeta, de modo que la NASA planeó un largo viaje de cuatro años que incluyó un complejo sobrevuelo de Venus y la Tierra; a continuación realizó tres sobrevuelos de Mercurio con el objeto de variar la trayectoria lo suficiente para poner la sonda en órbita alrededor del planeta, cosa que hizo en marzo de 2011. Entonces, casi ocho años después de ser lanzada, fue cuando comenzó la segunda parte de la misión. Mientras una cámara dual tomó fotografías de todo el planeta, un conjunto de detectores

de rayos gamma, X y neutrones identificó la composición de la superficie. Un altímetro láser cartografió las alturas de los rasgos superficiales.

Los datos de la MESSENGER revelaron la existencia de volcanes y de un núcleo de hierro proporcionalmente mucho mayor que el de la Tierra. La temperatura en el lado diurno se estimó en 430 grados Celsius, mucho mayor de lo que se creía hasta entonces. También descubrió algo sorprendente: hielo. El análisis realizado por la sonda confirmó observaciones hechas mediante radar desde la Tierra, que apuntaban a la posible existencia del agua en forma de hielo en el polo norte de Mercurio.

El conocimiento científico que se obtuvo gracias a la MESSENGER amplió y complementó ampliamente el proporcionado por la sonda Mariner 10. Para seguir la senda, las agencias espaciales europea y japonesa están desarrollando en la actualidad una nueva sonda de exploración. Bautizada como BepiColombo, se espera que sea lanzada en 2018. Tardará seis años en llegar a su destino, cifra que recuerda lo difícil que es llegar a un cuerpo tan cercano al Sol, incluso con la tecnología actual.

VENUS: UN MUNDO SIMILAR A LA TIERRA, EN VERSIÓN HOT

Venus es el planeta más cercano a la Tierra, y es el mundo más parecido al nuestro en términos de masa, gravedad superficial y tamaño. Recibe el nombre de la diosa romana del amor y, al ser un planeta interior al nuestro, solamente puede verse antes del amanecer o después del atardecer. Su brillo aparente, superior al de todos los cuerpos salvo el Sol y la Luna, no ha dejado indiferente a ninguna cultura antigua o moderna.

Venus, como planeta, ha tomado parte en algunas de las más famosas historias de la astronomía. Cuando Galileo observó que presenta fases similares a las de la Luna, el sistema ptolemaico se vino abajo tras más de mil años y la Tierra dejó de ser el centro del universo conocido. Puesto que la órbita de Venus se encuentra entre la Tierra y el Sol, Venus pasa por delante del Sol cada cierto tiempo y, observando su tránsito desde la Tierra,

se puede obtener información sobre las variaciones en el radio solar o en la rotación de nuestro propio planeta. Eso permite realizar mediciones precisas sobre el tamaño de nuestro sistema solar, comenzando por la distancia Tierra-Luna.

A pesar de ello, hasta el siglo xx prácticamente no se sabía nada sobre el planeta Venus propiamente dicho. El motivo era la existencia de una densa capa de nubes que cubre toda su superficie de modo permanente. No hay forma de observar su superficie desde la Tierra, por muy perfeccionado que sea el telescopio. Los grandes radiotelescopios permitieron obtener alguna información sobre su temperatura y la duración de su día, en tanto que la espectroscopía ayudó a conocer algo sobre la composición de su atmósfera; y poco más.

No es de sorprender, por tanto, que cuando la carrera espacial comenzó en octubre de 1957 con el lanzamiento del satélite Sputnik 1, Venus fuese objetivo prioritario de ambas potencias: Estados Unidos y la antigua Unión Soviética. A las habituales razones de prestigio se unía un franco desconocimiento sobre las características de nuestro vecino planetario más cercano, algo que la exploración espacial no tripulada podría resolver.

Los primeros años de la carrera espacial planetaria fueron una serie continua de penalidades para los soviéticos, y Venus es un buen ejemplo de ello. Entre los años 1961 y 1967 la entonces Unión Soviética envió una docena de sondas, y todas ellas fallaron salvo una, la Venera 4, que, debido a las infernales condiciones del planeta, ni siquiera pudo enviar comunicaciones desde la superficie. Sin embargo, logró al menos transmitir datos sobre la atmósfera, revelando que, incluso a 27 kilómetros de altitud, la presión del aire es de 57 atmósferas y la temperatura se acerca a los 500°C.

Las sondas Venera 4, 5 y 6 lograron enviar información desde la atmósfera, pero no fue hasta 1970 cuando, por primera vez, una nave consiguió aterrizar de forma suave en Venus. La hazaña, conseguida por la Venera 7, permitió estimar la temperatura superficial en 425°C y la presión en 90 atmósferas. Cinco años después la Venera 9 transmitió las primeras fotos desde la superficie, mostrando un panorama similar al de un día nublado en la Tierra.

EL EFECTO INVERNADERO VENUSIANO

Durante muchos años los escritores de ciencia ficción imaginaron un planeta Venus similar a la Tierra, sumido en niebla perpetua y quizá algo más caliente pero, en esencia, un mundo gemelo a la Tierra. La temperatura real, medida por vez primera en la década de los cincuenta, constituyó toda una sorpresa al sobrepasar incluso a la registrada en la superficie de Mercurio, un mundo mucho más cercano al Sol. La explicación de esta anomalía se debe al astrofísico germano-estadounidense Rupert Wildt (1905-1976), quien en 1940 conjeturó que el dióxido de carbono podría ser el responsable de que una atmósfera planetaria atrape calor que, de otro modo, escaparía al espacio, proceso que conllevaría una elevación de la temperatura media. Wildt nunca fue tomado en serio porque su teoría predecía temperaturas muy altas en la superficie de Venus, pero las mediciones de las sondas espaciales confirmaron su hipótesis y en los años sesenta su esfuerzo fue reivindicado gracias al trabajo de un joven astrofísico estadounidense llamado Carl Sagan (1934-1996) (en la fotografía), que más tarde se convertiría en un célebre divulgador. Ahora se acepta que el efecto invernadero no solo es responsable de las altas temperaturas en Venus sino que también puede notarse en la Tierra,

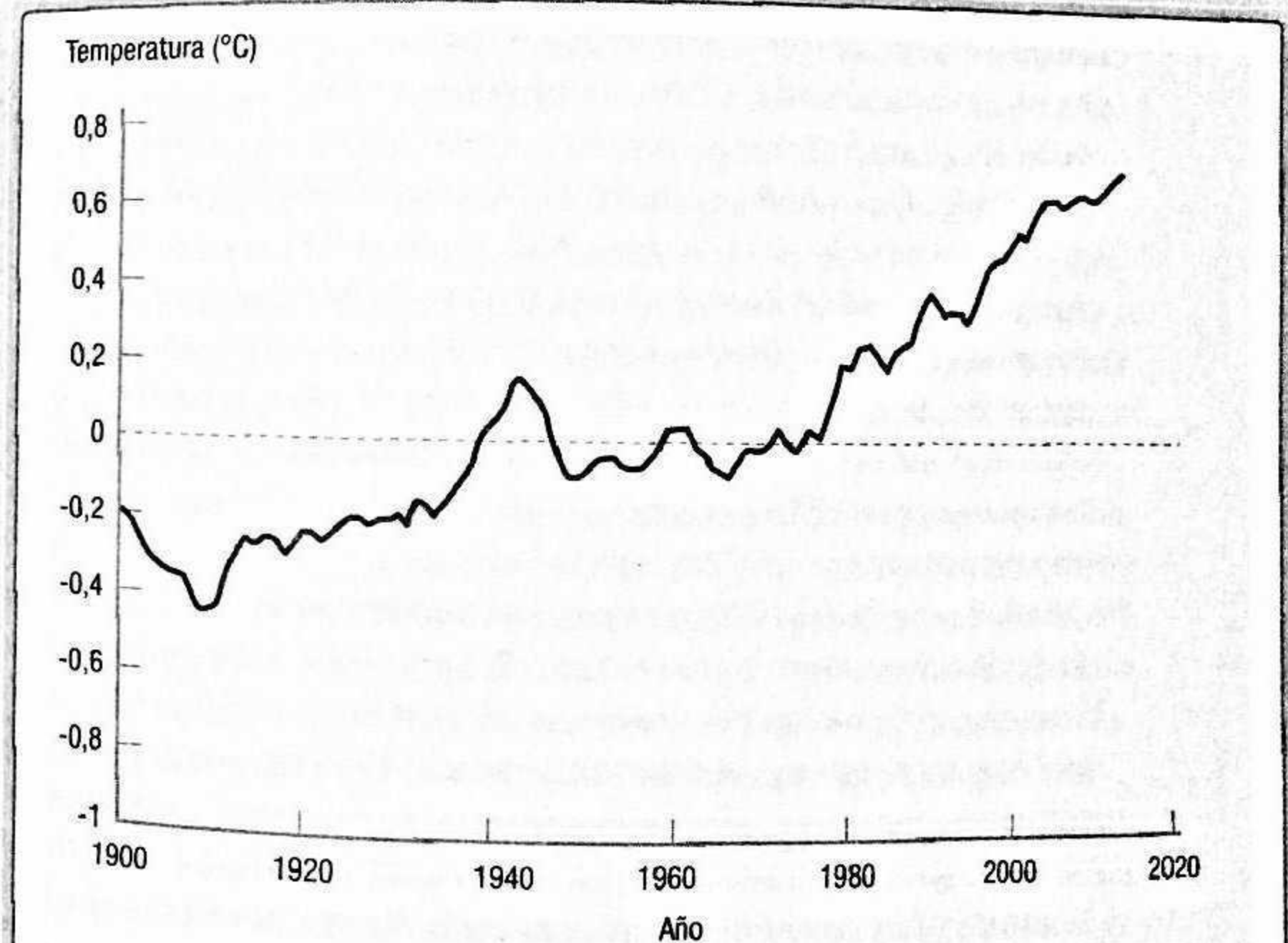


El astrónomo y escritor Carl Sagan dinamizó las ciencias planetarias y las hizo extensas al gran público. Su entusiasmo por la ciencia le llevó a hacer aportaciones muy relevantes.

donde la actividad humana ha elevado la concentración de CO_2 casi un 50% en los últimos cien años. Los modelos climáticos que incorporan los niveles actuales de CO_2 (en la figura, las variaciones temporales de la temperatura de la superficie terrestre) predicen una elevación en la temperatura global del planeta y un aumento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos.

Conocimientos extrapolables

Tras estudiar los efectos de las grandes tormentas de polvo que recorren de forma periódica el planeta Marte, Sagan y otros concluyeron que el mismo proceso que tiene lugar en el planeta rojo podría suceder en la Tierra en caso de una guerra nuclear a gran escala. Grandes cantidades de humo y polvo se inyectarían en la atmósfera reflejando la luz solar y produciendo un enfriamiento global. El efecto, bautizado como «invierno nuclear», fue un factor determinante en la distensión nuclear de los años ochenta, que conllevó diversos tratados de reducción de armamento nuclear y reforzó la idea de que en una guerra nuclear, todos somos perdedores.



Variación de la temperatura media global sobre la superficie terrestre respecto al valor promedio 1951-1980.

El cosmos es todo lo que es, todo lo que fue y todo lo que será.

CARL SAGAN

Estados Unidos, por su parte, prestó poco interés a Venus como objetivo científico. Durante los años sesenta envió solamente tres naves, dos de las cuales (Mariner 2 en 1962 y Mariner 5 en 1967) realizaron breves sobrevuelos. No fue hasta 1978 cuando la Pioneer Venus 1 llegó a Venus con la misión de efectuar mapas de la superficie. Las nubes resultan totalmente

opacas para la observación en el espectro visible pero son transparentes a las ondas de radio, así que la sonda fue equipada con un radar.

Los planetólogos descubrieron que la superficie de Venus es, en conjunto, mucho menos rugosa que la de la Tierra, a pesar de lo cual una de sus montañas más elevadas, el llamado Monte Maxwell, se eleva casi once kilómetros sobre el nivel promedio. Otros instrumentos sensibles a radiaciones infrarrojas y ultravioletas revelaron rasgos de la capa nubosa, y las cámaras registraron la presencia de rayos. En cuanto al campo magnético de Venus, es prácticamente inexistente. Una sonda gemela, la Pioneer Venus 2, disparó tres sondas que, provistas de paracaídas, realizaron un descenso suave mientras medían las características de la atmósfera.

Por su lado, la URSS continuó enviando sondas de exploración a Venus con un éxito notable. En 1981 las Venera 13 y 14 realizaron muestreos de la superficie que revelaron la existencia de un suelo parecido al basalto terrestre pero con mayor contenido de potasio, y en 1983, las Venera 15 y 16 realizaron un cartografiado de la superficie mediante radar. Un año después, en 1984, las naves Vega 1 y 2 realizaron la misión más ambiciosa a Venus hasta la fecha. Un conjunto de globos sondeó una atmósfera cuyas capas superiores están formadas por gotas de ácido sulfúrico, y sendos módulos de aterrizaje realizaron análisis químicos de la superficie, donde se encontró un compuesto rocoso de anortosita y troctolita, muy raro en la Tierra pero presente en la superficie lunar.

Ese fue el fin del programa soviético de exploración venusiana. En 1990 la Unión Soviética dejó de existir como estado soberano, pero acabada la Guerra Fría otras sondas no tripuladas

continuaron realizando visitas a Venus y enviando información científica de gran valor. Destacan la estadounidense Magellan (Magallanes), que en 1990-94 realizó nuevos mapas radar de más alta resolución gracias a los cuales ahora se dispone de evidencias de vulcanismo venusiano (en la fotografía superior de la página 53, la región de Eistla), y la Venus Express de la Agencia Espacial Europea que entre 2006 y 2014 examinó a fondo la dinámica, estructura y composición de la atmósfera.

También es digna de destacar la misión espacial japonesa Akatsuki, diseñada para el estudio de la atmósfera de Venus. Al igual que sucedió a estadounidenses y soviéticos, los ingenieros nipones se encontraron con varios problemas: el vuelo duró cinco años más de lo estimado, debido a que el primer intento de alcanzar una órbita alrededor del planeta falló, y al menos dos de sus cámaras sufrieron daños. Tras seis décadas de exploración, Venus sigue siendo aún un objetivo difícil.

MARTE, UN PLANETA DURO DE PELAR

Si Venus es considerada la diosa de la belleza gracias, en parte, a su aspecto blanco virginal, Marte lleva el nombre del dios romano de la guerra debido al color rojizo que tiñe su superficie y que resulta visible incluso desde la Tierra.

Aunque Galileo levantó su telescopio hacia el cielo a comienzos del siglo XVI no fue hasta el siglo XIX cuando la calidad de los instrumentos astronómicos permitió observar rasgos de la superficie marciana. Aun así, la atmósfera terrestre, la limitación de los telescopios y la propia del ojo humano hacía que los mapas de Marte que se dibujaban fueran contradictorios entre sí.

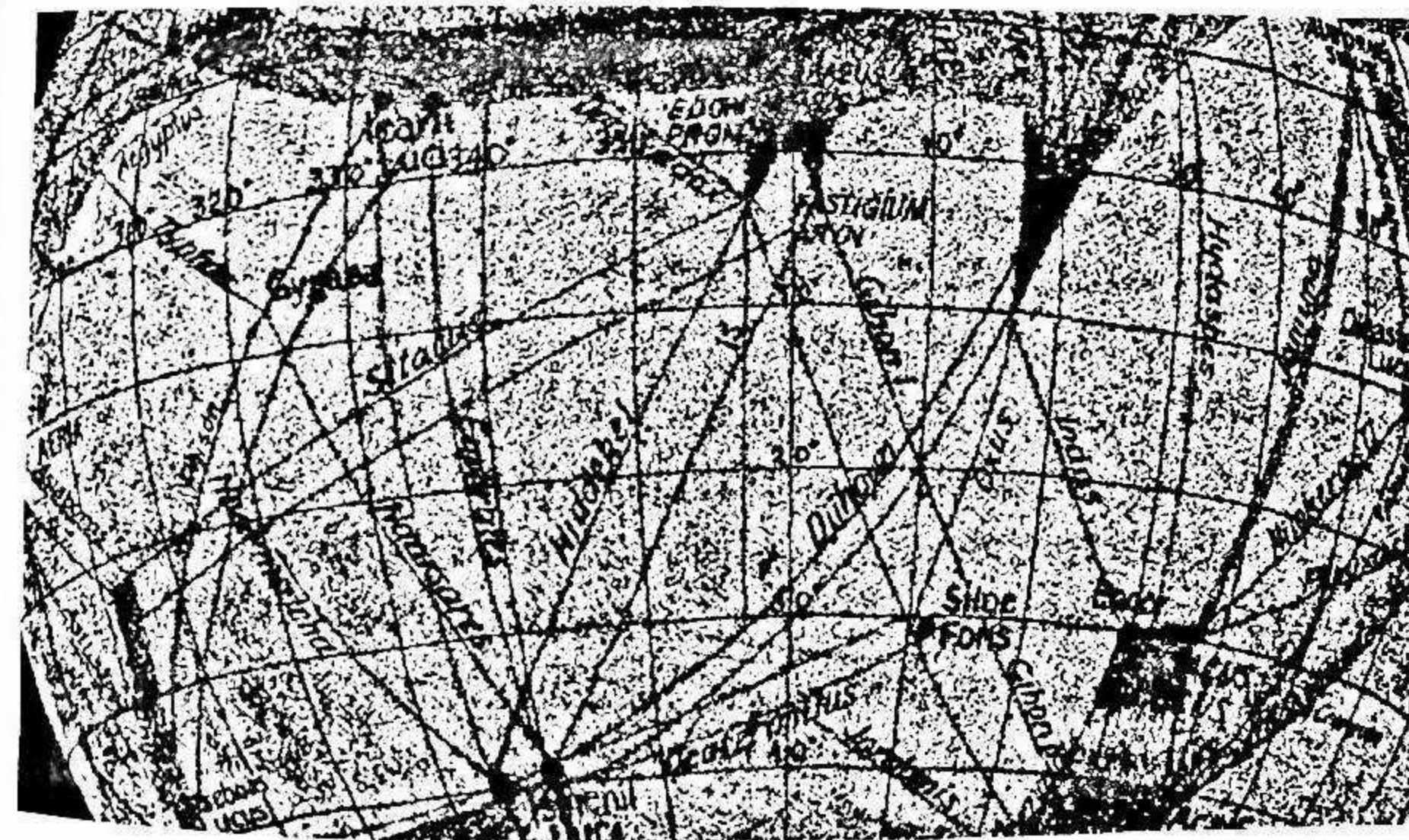
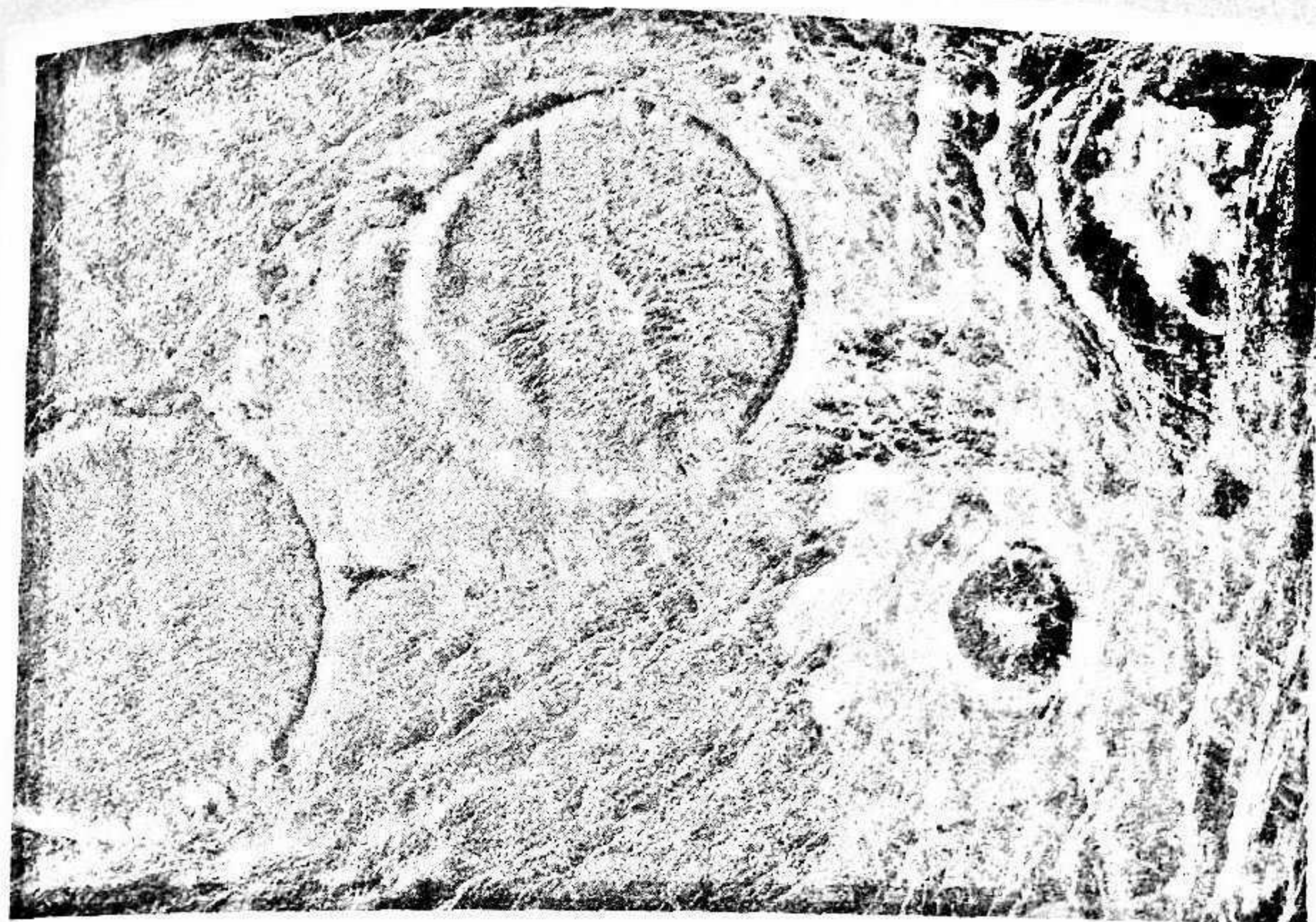
Es bien conocido en la historia de la ciencia el caso de los canales de Marte. El astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli (1835-1910) dibujó en 1877 un detallado mapa del planeta rojo en el que se incluían unos canales. Su trabajo fue continuado en Estados Unidos por Percival Lowell (en la imagen inferior de la página 53, un esbozo de los supuestos canales marcianos hecho por él), quien creyó erróneamente que los *canali* o cauces de

Schiaparelli eran en realidad *canals*, término inglés referido a un canal artificial. La hipótesis de que Marte estaba habitado por seres inteligentes que intentaban trasvasar agua a la deses- perada para salvar su civilización hizo furor a finales del siglo XIX, culminando en la obra maestra de H.G. Wells *La Guerra de los Mundos*. Escritores como Edgar Rice Burroughs y Ray Bradbury plasmaron en sus novelas civilizaciones marcianas con héroes y villanos, y todavía hoy se suele utilizar el término «marciano» para referirse a un visitante extraterrestre.

La historia de la exploración a Marte es una larga lista de misiones fracasadas. El éxito llegó primero a los estadounidenses con el sobrevuelo de la sonda Mariner 4 en 1964, cuyas fotografías mostraron por vez primera el aspecto de la superficie de Marte. Se reveló un panorama de cráteres similar al de la Luna, salpicado con signos geológicos de que el agua líquida fluyó en el pasado por su superficie. La NASA hizo pasar la sonda por detrás del planeta para que sus señales de radio se desviasen debido a la atmósfera marciana, lo que permitió medir su presión. Cinco años después, en 1969, la radiación infrarroja captada por un instrumento del Mariner 6 indicó que el casquete polar de Marte estaba compuesto por dióxido de carbono sólido a una temperatura de entre -73 y -125 °C. Ese fue el importante pero magro balance científico de la exploración marciana en los años sesenta.

La década de los setenta abrió la era del módulo de aterrizaje suave, conocido en inglés como *lander*. Depositar una sonda sobre la superficie de un planeta cuya atmósfera es cien veces más tenue que la terrestre no es tarea fácil, pero la sonda soviética Mars 3 lo logró en diciembre de 1971. Se trató de una hazaña a la que, por desgracia, no acompañó el éxito científico. Una violenta tormenta de polvo azotaba el planeta en esos momentos, y las partículas provocaron un cortocircuito en el aterrizador tan solo 20 segundos después del aterrizaje. Los orbitadores de la Mars 3 y de su gemela Mars 2 no pudieron efectuar fotografías detalladas de la superficie debido a la extensa capa de polvo que cubría Marte.

Hubo que esperar hasta 1972 para que la sonda estadounidense Mariner 9 enviase un juego fotográfico completo de la super-



A lo largo de los años la ciencia planetaria ha ido avanzando con dificultad, y entre los logros reales, como el descubrimiento de las características de la superficie de Venus (arriba, vista desde la sonda Magallanes de la NASA), se han colado falsedades, como los supuestos canales de Marte (abajo) imaginados a comienzos del siglo xx.

ficie. La espera valió la pena. La superficie aparece cubierta por gran cantidad de cañones, vestigios de antiguos ríos secos, algunos de más de 1 700 kilómetros de longitud. Se identificaron más de una veintena de volcanes, incluido el Monte Olimpo, un coloso que con sus seiscientos kilómetros de diámetro y veinticinco de altura es el mayor volcán conocido de todo el sistema solar. Los espectrómetros infrarrojos de la Mariner 9 identificaron la presencia del mineral montomorillonita así como de otros compuestos de arcilla.

A pesar de ello, el dios de la guerra continuaba guardando celosamente sus secretos. No se sabía nada sobre la composición del suelo de Marte y, lo más importante, si encerraba vida. Las fotografías no mostraban animales o zonas arboladas, por no hablar de restos de construcciones o canales. En cuanto a las posibilidades de vida simple, Marte no parece ofrecer un ambiente idóneo. Las temperaturas invernales marcianas convierten a la Antártida en un paraíso tropical por comparación, la tenue atmósfera carece por completo de oxígeno y, sin una capa de ozono protectora, los rayos ultravioleta del Sol esterilizan sin piedad la superficie. Aun así hay que tener en cuenta que la Tierra abunda en ejemplos de microorganismos capaces de sobrevivir en circunstancias extremas, así que la existencia de vida en la superficie marciana es una posibilidad real. Para buscarla, la NASA envió en 1976 las naves gemelas Viking 1 y 2, cada una de las cuales constaba de un orbitador y un aterrizador equipado con un sofisticado laboratorio para el análisis de suelo y aire.

Teniendo en cuenta que toda la experiencia acumulada sobre un aterrizaje en Marte se limitaba a los 20 segundos de transmisiones de la Mars 3 una década y media antes, la misión Viking parecía de una ambición rayana en la arrogancia. En esta ocasión, sin embargo, la maldición de Marte se tomó un respiro y los dos aterrizadores se posaron sin problemas en las regiones de Planicia Chryse y Planicia Utopia. Las fotografías tomadas a color mostraron un suelo rocoso y polvoriento, no muy diferente al de muchos parajes de la Tierra. Un observatorio meteorológico midió las condiciones de temperatura, dirección y velocidad del viento, y un sismómetro registró cualquier «martemoto» que

pudiera generarse; simultáneamente al rastreo por tierra, los orbitadores fotografiaron la superficie marciana con un detalle sin precedentes.

Pero eran los dos laboratorios biológicos a bordo de los aterrizadores los que buscarían la respuesta a la pregunta más importante: ¿hay vida en Marte? Un brazo robótico extrajo diversas muestras que fueron sometidas a tres análisis distintos en busca de vida microbiana. Los científicos esperaban obtener una respuesta clara pero se vieron frustrados con el resultado: no era concluyente. Algunos de los análisis parecieron dar indicios positivos de vida, pero existe también la posibilidad de que se tratase de reacciones químicas inducidas por el bombardeo de luz ultravioleta que llega a la superficie. La existencia de vida en Marte no se pudo confirmar, ni tampoco refutar.

El éxito del programa Viking animó a la NASA a emprender una nueva fase en la exploración de otros mundos. Si un vehículo puede aterrizar en la superficie de Marte y funcionar como un laboratorio de forma autónoma, ¿por qué no hacerlo móvil? El concepto del aterrizador estático deja paso al del *rover* (en inglés significa trotamundos), un astromóvil o vehículo explorador autónomo que recorre el terreno y examina su composición física y química.

En 1997 el aterrizador Mars Pathfinder realizó un aterrizaje suave y liberó al Sojourner, un pequeño vehículo de tan solo diez kilogramos de masa. Ambos dispositivos realizaron mediciones de la atmósfera, analizaron el suelo y tomaron imágenes, demostrando que incluso un pequeño rover puede explorar con éxito la superficie de otro mundo y que un aterrizador puede posarse suavemente sobre una superficie planetaria mediante una combinación de cohetes, aerofrenos y un novedoso sistema de airbags; como ventaja adicional, lo hizo con un presupuesto bajo.

El éxito del concepto Pathfinder/Sojourner abrió el camino a posteriores expediciones de rover marcianos. El rover Spirit, que aterrizó en 2004, recopiló información durante seis años hasta que se atascó en una trampa de arena; otros, como el Opportunity (2004) y el Curiosity (2012) continúan operativos a fecha de hoy. Paralelamente, una flota de orbitadores ha examinado la

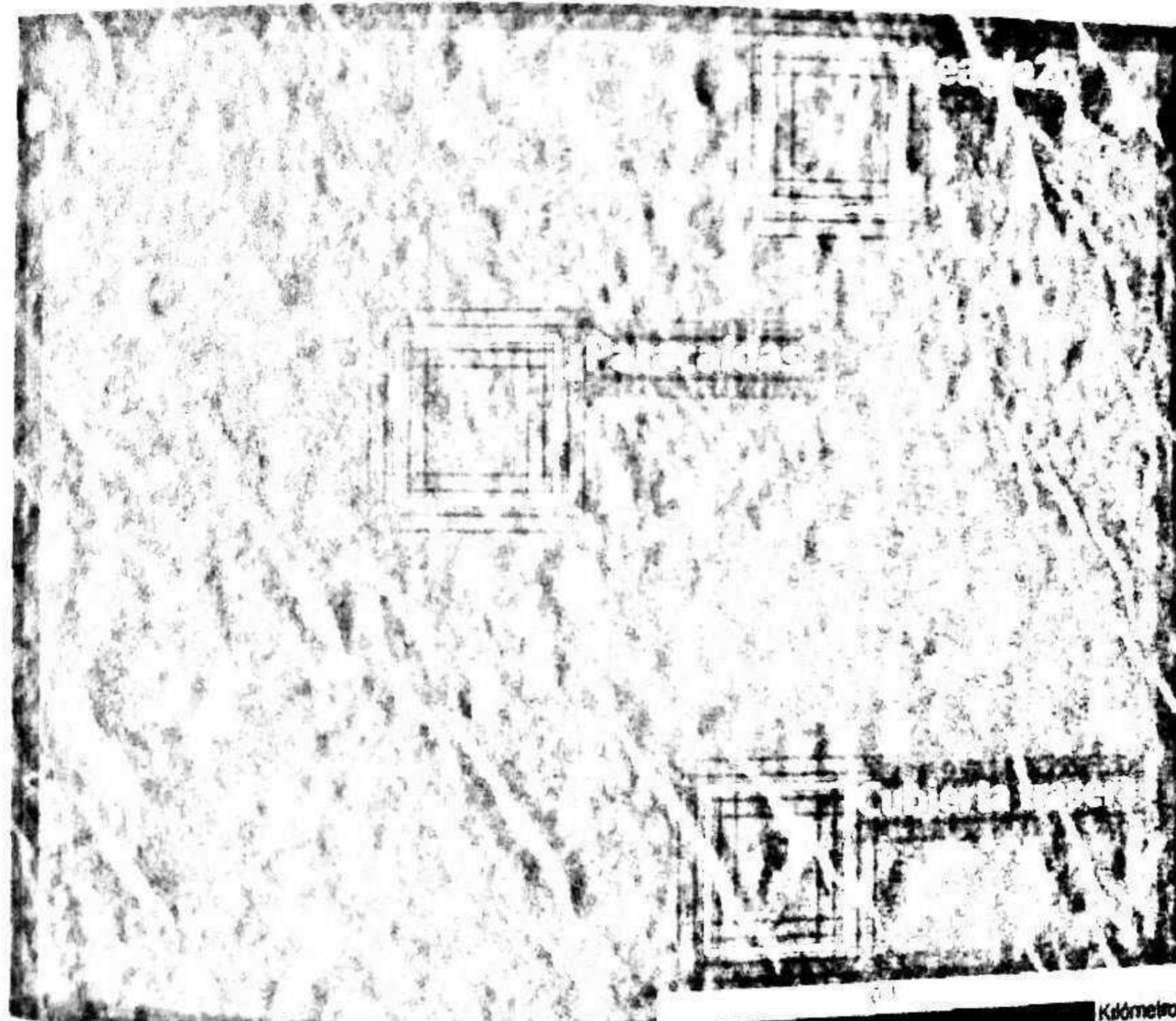
LA MALDICIÓN DE MARTE

El «gafe» que acompañó a las misiones no tripuladas a Marte siguió tras el periodo clásico de la carrera espacial (ver en la gráfica la proporción de éxitos y fracasos). En 1989 la sonda soviética Fobos 1 llegó a la órbita marciana solo para quedar desactivada por culpa de un error informático. La URSS tardó casi una década en enviar una nueva sonda a Marte y, cuando lo hizo con la Mars 96 (ya como Federación Rusa), fue tan solo para verla caer a Tierra poco después del lanzamiento. Sus restos, incluidos 200 gramos de plutonio que iban a bordo de los aterrizadores, se perdieron para siempre en tierras chilenas. La NASA no se quedó atrás. En 1992 el orbitador Mars Observer enmudeció por un problema técnico dos días antes de entrar en órbita marciana. La Mars Climate Observer, en 1998, se estrelló por un absurdo error: uno de sus programas de software interpretó los datos de empuje en base a las unidades estadounidenses (libras-fuerza) en lugar de las del Sistema Internacional (Newtons). Al año siguiente la Mars Polar Lander se estrelló contra la superficie marciana porque uno de sus sensores creyó erróneamente que la sonda había aterrizado y cortó el empuje de los motores antes de tiempo.

Fatalidad sin fronteras

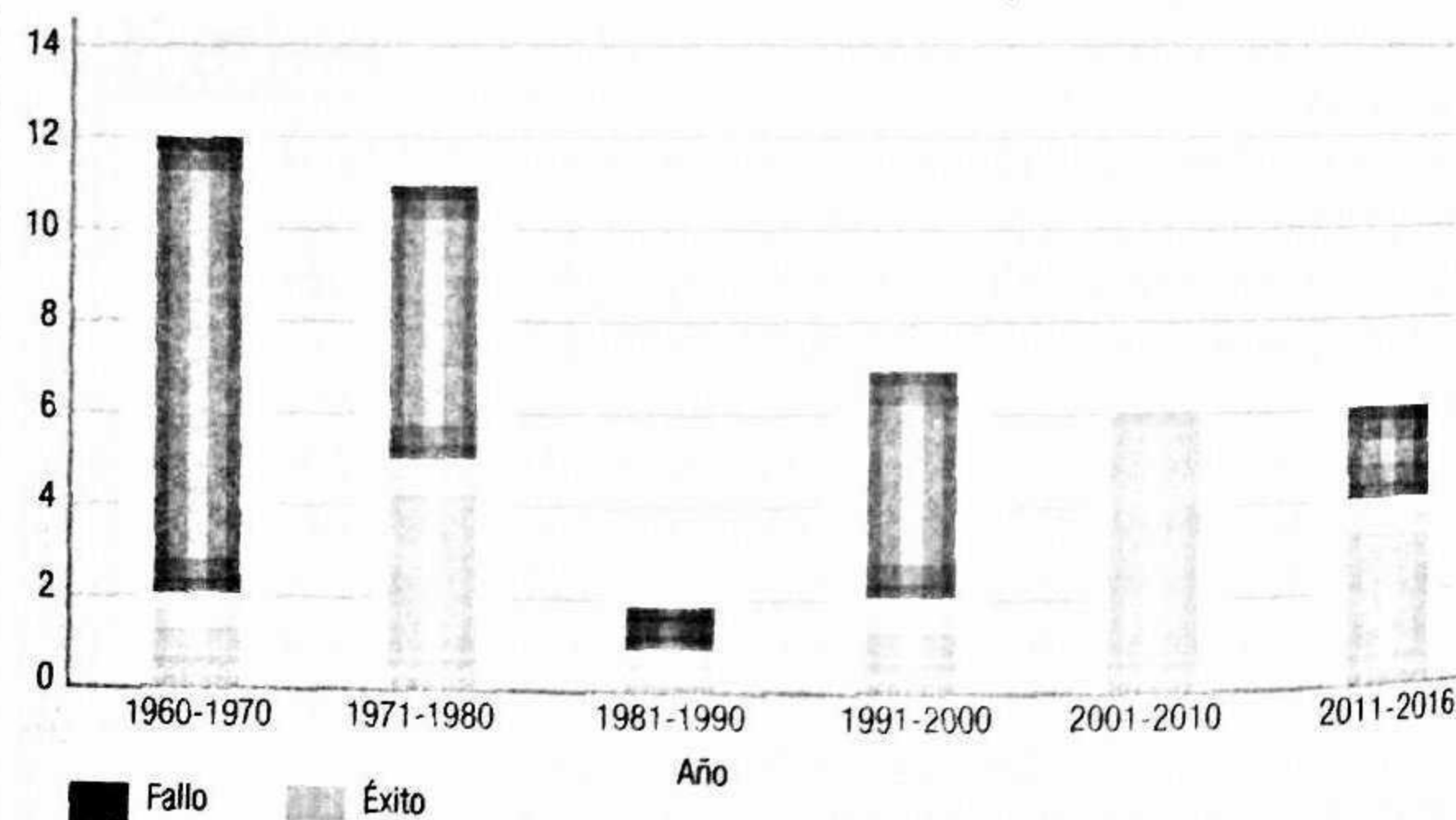
Los recién llegados no tuvieron mejor suerte. A finales del siglo pasado Japón lanzó la sonda Nozomi, que tardó en llegar tres años más de lo calculado y para entonces su com-

bustible para maniobrar se había agotado, las llamaradas solares habían dañado gravemente sus sistemas electrónicos y la misión se consideró fallida. El orbitador Mars Express, primera misión a Marte de la ESA, ha proporcionado excelente información científica desde su llegada en 2003 hasta el día de hoy; pero su módulo Beagle 2 (en la imagen), diseñado para buscar signos de vida en la superficie, perdió contacto con la Tierra nada más aterrizar. Años después se repitió el guion: en 2016 el orbitador ruso-europeo ExoMars TGO entró en órbita marciana mientras su aterrizador Schiaparelli se estrellaba. Ese mismo año, transcurrida una década y media desde su último intento, Rusia construyó y lanzó la Phobos-Grunt, un ambicioso proyecto doble que incluía un orbitador a Marte y una misión para recuperar muestras de la luna Fobos; de modo simultáneo China hacia su primer intento de exploración marciana con el orbitador Yinghuo-1. Tanto la misión rusa como la china sufrieron un brusco final cuando el cohete que lanzaba ambas sondas falló y se estrelló contra la Tierra frente a las costas de Chile.



Restos del módulo Beagle 2 de la ESA fotografiados por la Mars Reconnaissance Orbiter en 2014.

Número de exploraciones no tripuladas



Número de exploraciones no tripuladas a Marte, proporción de éxitos y fracasos.

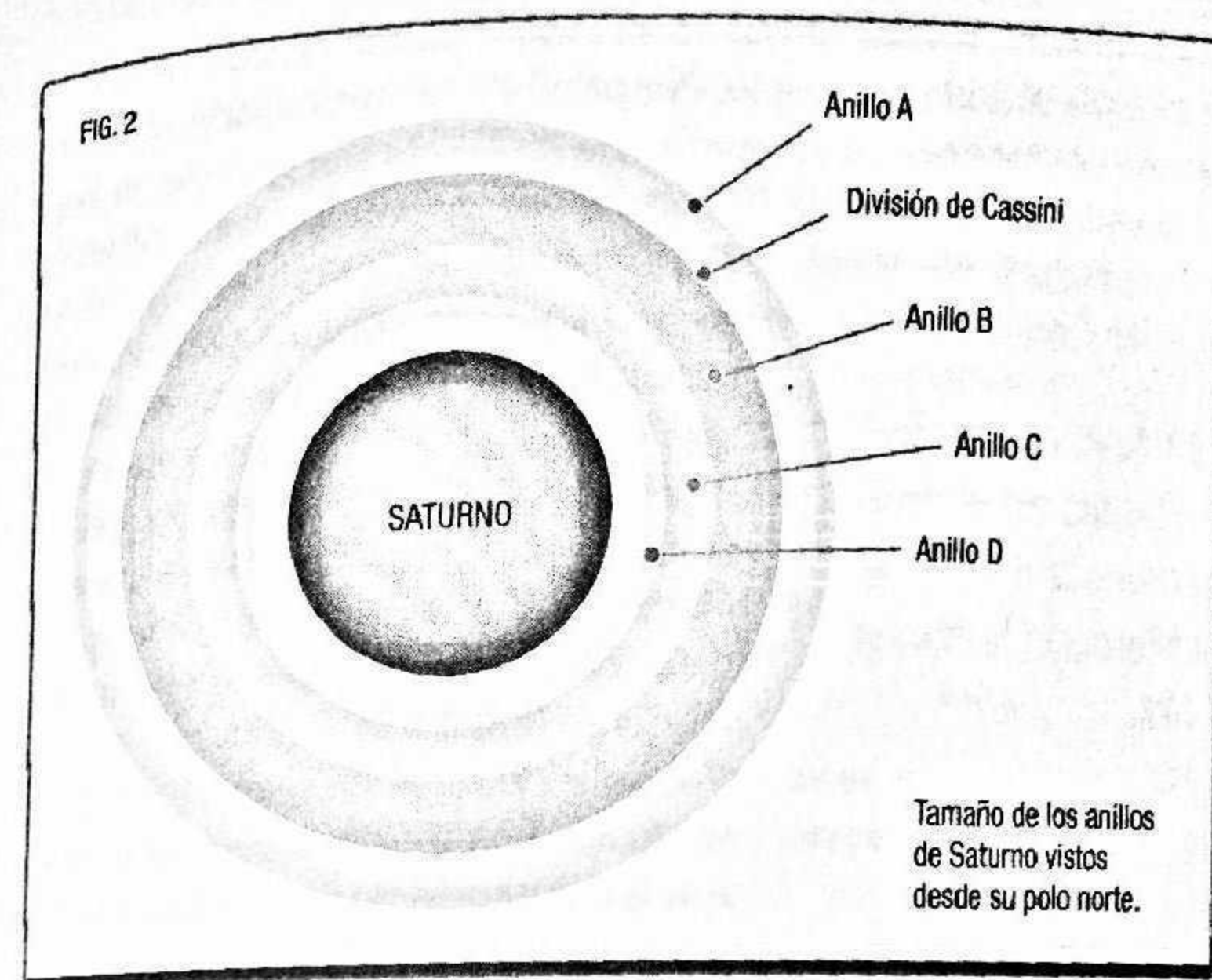
superficie de Marte y controlado cualquier cambio en su superficie mientras diversos aterrizadores han continuado el análisis químico y biológico del terreno.

Con todo, las grandes preguntas siguen sin respuesta, sobre todo dos de ellas: ¿hay agua líquida en Marte? y ¿hay vida en Marte? En el primer caso la existencia de hielo de agua está confirmada, y abundan los indicios de que en el pasado hubo ríos fluyendo, pero aún no se ha encontrado la prueba definitiva sobre la existencia de agua líquida en el presente a pesar de las entusiastas conferencias de prensa de la NASA al respecto. En cuanto a la segunda pregunta, por el momento la respuesta sigue siendo no. Se espera que la futura misión Mars 2020 pueda determinar de modo definitivo si existió vida marciana en el pasado. A la vista de los datos recogidos hasta ahora queda fuera de toda duda que el planeta rojo pudo tener agua líquida y las condiciones para albergar vida; que realmente la haya tenido alguna vez continúa siendo un tema abierto.

CUATRO GIGANTES EXTERIORES

Pasados los cuatro planetas más cercanos al Sol (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte) existen otros cuatro, tan similares entre sí como diferentes a los anteriores. Se trata de mundos de mucho mayor tamaño, cubiertos con atmósferas masivas de varios miles de kilómetros de espesor.

El primero de ellos es Júpiter, el mayor mundo de nuestro sistema solar. Es tan grande que constituye un sistema planetario por derecho propio y, de hecho, uno de los primeros descubrimientos de Galileo fue la existencia de cuatro satélites que giran a su alrededor, y que hoy conocemos como satélites galileanos: Ío, Europa, Ganímedes y Calixto. El segundo, Saturno, es comparable en cuanto a tamaño y número de satélites y, además, como se aprecia en la figura 2, cuenta con un extraordinario sistema de anillos a su alrededor que resulta visible desde la Tierra. Ambos planetas se conocen desde la Antigüedad, y aunque no se sabía entonces nada acerca de su tamaño recibieron nombres



mitológicos importantes: para los romanos, Júpiter era el rey de los dioses, y su padre Saturno, rey del tiempo.

Los otros dos planetas gigantes fueron desconocidos para la humanidad hasta que en 1781 el astrónomo germano-británico William Herschel (1738-1822) descubrió uno de ellos por casualidad. Conocido inicialmente con el nombre de Georgium Sidum («estrella de Jorge») en honor al rey Jorge III del Reino Unido, fue finalmente bautizado con el nombre de Urano, padre de Saturno y dios del cielo. El movimiento de Urano en la bóveda celeste hizo sospechar sobre la existencia de otro planeta, y en 1846 se descubrió el que hoy conocemos como Neptuno.

Los satélites de estos cuerpos pueden observarse desde la Tierra, así como los anillos de Saturno y algunos rasgos superficiales (particularmente la gran Mancha Roja de Júpiter), pero la atmósfera terrestre impone un límite a la calidad de las observaciones. No es que la exploración desde el espacio sea conveniente, es que resulta poco menos que imprescindible.

La primera nave que logró sobrevolar el planeta Júpiter fue la Pioneer 10. Lanzada en marzo de 1972, no llegó hasta casi dos

años después, a pesar de que en su momento fue el objeto más veloz jamás lanzado al espacio. Por primera vez una sonda utilizaba un generador nuclear, ya que, a una distancia tan grande, la baja intensidad de la luz solar dificulta el uso de paneles fotovoltaicos para producir electricidad. Durante el sobrevuelo hubo que fotografiar y registrar información ambiental no solo del planeta sino

Por lo tanto concluyo sin vacilación que hay tres estrellas en el cielo moviéndose alrededor de Júpiter, como Venus y Mercurio lo hacen alrededor del Sol.

GALILEO GALILEI. (DÍAS MÁS TARDE VISLUMBRARÍA EL CUARTO SATÉLITE JUPITERIANO)

también de su extenso sistema de lunas; todo ello a una velocidad de más de 35 kilómetros por segundo, en un ambiente de radiación intensa y a una distancia tan grande que cualquier dato transmitido tardaría casi hora y media en llegar a la Tierra. La misión de la Pioneer 10 fue todo un éxito. Los magnetómetros revelaron la existencia de un intenso campo magnético planetario, cuya «cola» se extiende hasta la órbita de Saturno, y las cámaras lograron fotografiar la superficie de Júpiter con un detalle sin igual. Tras su misión original, la sonda continuó su viaje hacia el exterior del sistema solar y, aunque no se encontraron más cuerpos celestes en su camino, continuó recogiendo información sobre el medio interplanetario hasta que la NASA perdió contacto con ella en 2003, más de treinta años después de su lanzamiento.

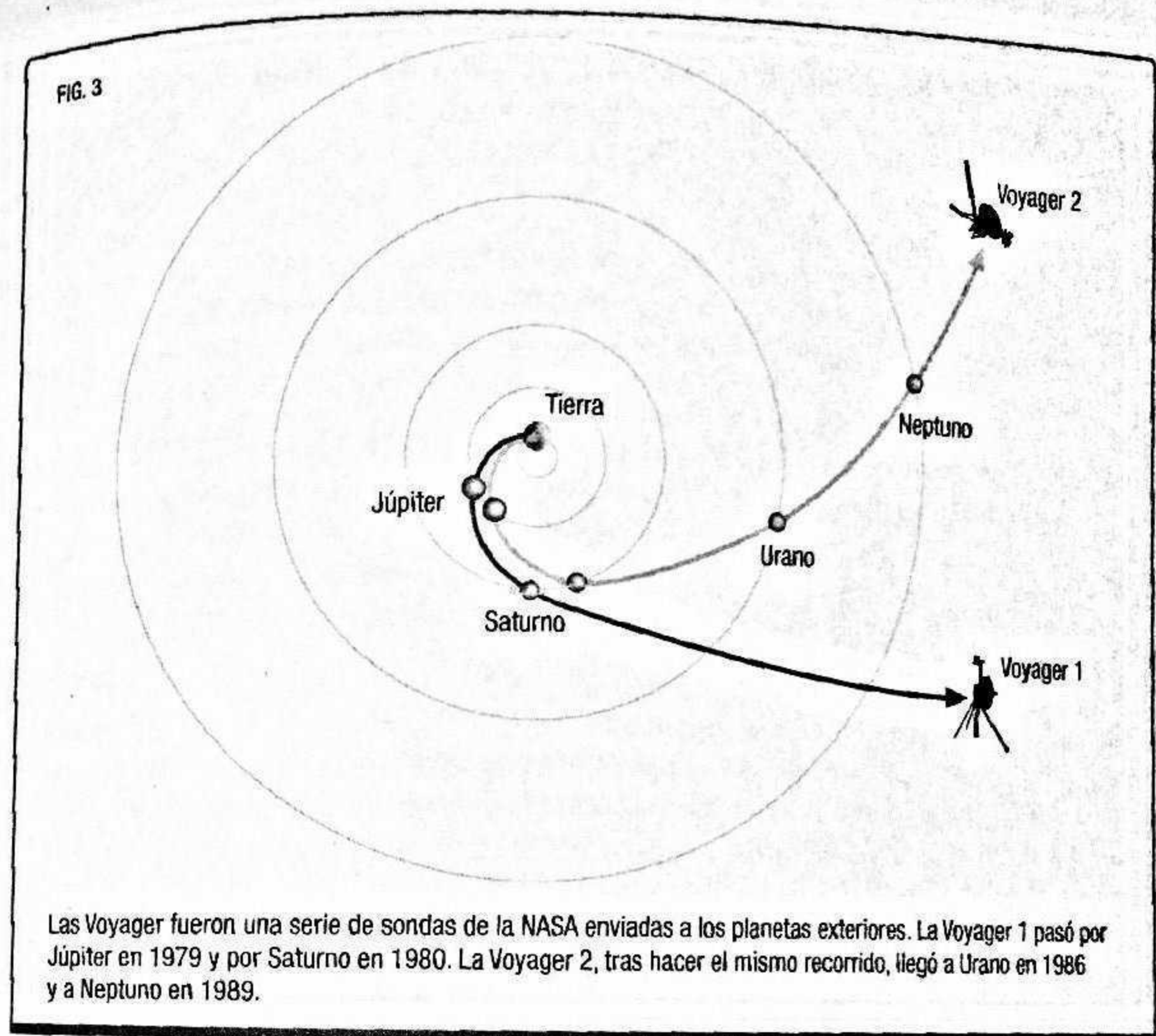
El éxito de esta sonda se repetiría en la misión Pioneer 11, que alcanzó el sistema jupiterino en abril de 1975. Se trató de una misión de doble objetivo, ya que la sonda aprovechó el campo gravitatorio de Júpiter para virar en dirección a Saturno, donde llegó en septiembre de 1979. Los científicos pudieron constatar la existencia de un campo magnético en Saturno, y las imágenes mostraron estructuras desconocidas hasta entonces en su sistema de anillos.

Para cuando la Pioneer 11 terminó sus tareas de exploración en Saturno ya había una nueva misión en marcha. La NASA descubrió en los años sesenta que una particular disposición en las posiciones de los planetas exteriores permitiría a una nave recorrerlos uno tras otro mediante una serie de maniobras de asis-

La misión de la Pioneer 10 fue todo un éxito. Los magnetómetros revelaron la existencia de un intenso campo magnético planetario, cuya «cola» se extiende hasta la órbita de Saturno, y las cámaras lograron fotografiar la superficie de Júpiter con un detalle sin igual. Tras su misión original, la sonda continuó su viaje hacia el exterior del sistema solar y, aunque no se encontraron más cuerpos celestes en su camino, continuó recogiendo información sobre el medio interplanetario hasta que la NASA perdió contacto con ella en 2003, más de treinta años después de su lanzamiento.

El éxito de esta sonda se repetiría en la misión Pioneer 11, que alcanzó el sistema jupiterino en abril de 1975. Se trató de una misión de doble objetivo, ya que la sonda aprovechó el campo gravitatorio de Júpiter para virar en dirección a Saturno, donde llegó en septiembre de 1979. Los científicos pudieron constatar la existencia de un campo magnético en Saturno, y las imágenes mostraron estructuras desconocidas hasta entonces en su sistema de anillos.

Para cuando la Pioneer 11 terminó sus tareas de exploración en Saturno ya había una nueva misión en marcha. La NASA descubrió en los años sesenta que una particular disposición en las posiciones de los planetas exteriores permitiría a una nave recorrerlos uno tras otro mediante una serie de maniobras de asis-



tencia gravitacional. El programa, denominado Grand Tour, permitiría la visita a todos los planetas exteriores con una sola nave.

La oportunidad del Grand Tour solamente se da una vez cada 175 años, y la NASA la aprovechó con el lanzamiento de las sondas Voyager 1 y 2 en 1977 (figura 3). Se trató de versiones mejoradas de las Pioneer 10 y 11, con una novedosa cámara fotográfica a todo color, un conjunto de instrumentos para sondear atmósferas a distancia, y diversos sensores de plasma y campos magnéticos.

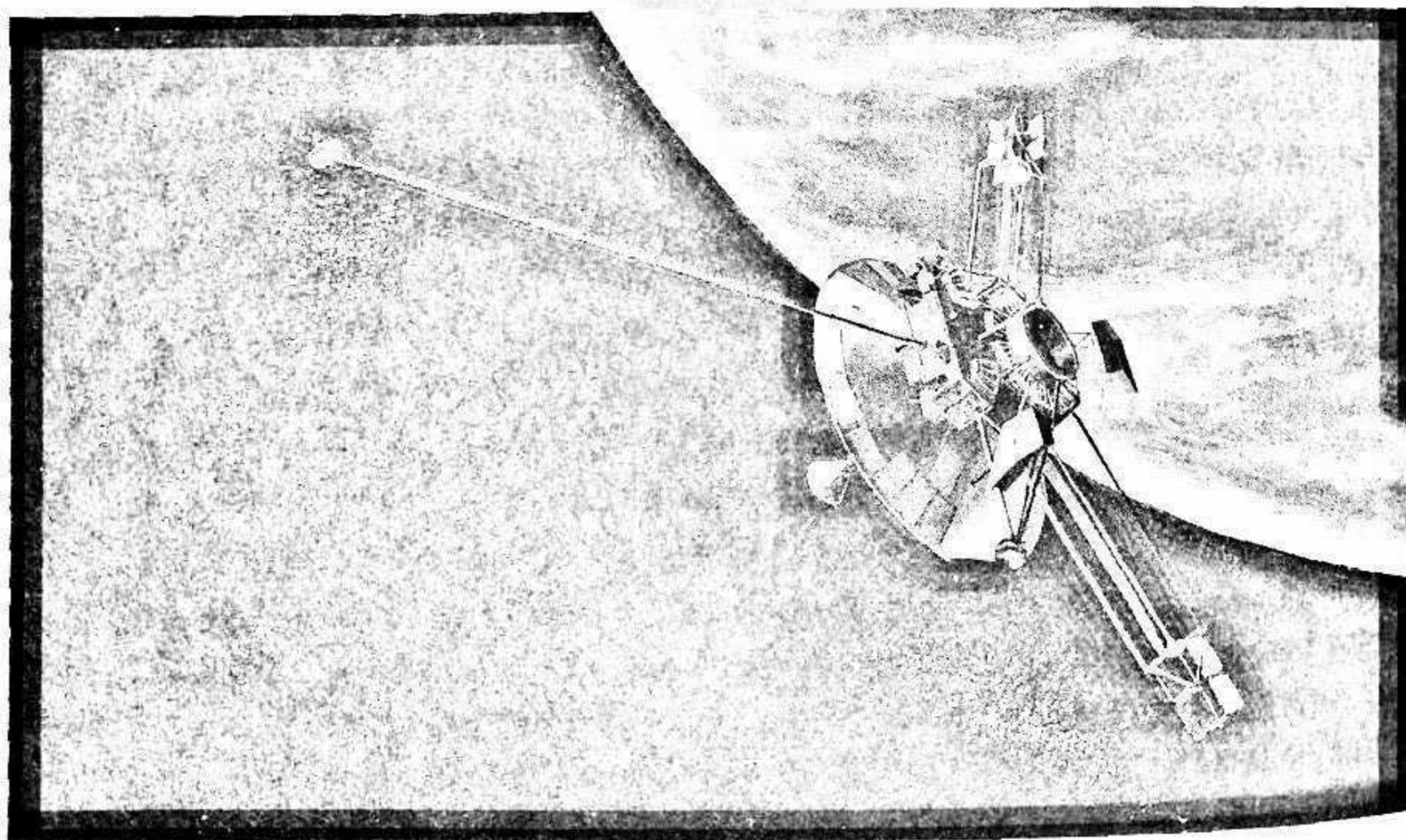
La primera de las Voyager realizó un recorrido por los sistemas de Júpiter y Saturno, y la segunda visitó además Urano y Neptuno. Los resultados fueron espectaculares, sobre todo en lo relativo a fotografías. La luna jupiterina Ío se reveló como el cuerpo geoló-

LA MISTERIOSA ANOMALÍA EN LA POSICIÓN DE LAS SONDAS PIONEER

A finales de los noventa las sondas Pioneer 10 (recreada en la ilustración) así como la 11, se alejaban velozmente del sistema solar. Aunque su misión había terminado, quedaba un enigma por resolver: sus posiciones diferían levemente de las calculadas por la NASA. La diferencia era muy pequeña pero medible. Se desarrollaron diversas hipótesis, algunas de ellas bastante osadas. Se conjeturó incluso que la teoría general de la relatividad de Einstein precisaba retoques, que la ley de gravitación de Newton no obedecía exactamente la ley del cuadrado inverso, o que se trataba de un indicio sobre la existencia de materia oscura. En un intento por aclarar las causas de esa anomalía, un grupo de científicos intentó acceder a los datos originales de posición para ambas naves y, para su sorpresa, descubrieron que esa información se estaba perdiendo. Los datos eran casi ilegibles, almacenados en medios obsoletos como discos flexibles y tarjetas perforadas. Parte de la información languidecía en cajas de cartón almacenadas bajo una escalera del Laboratorio de Propulsión a Reacción de la NASA (JPL, por *Jet Propulsion Laboratory*), ubicado en Pasadena, California.

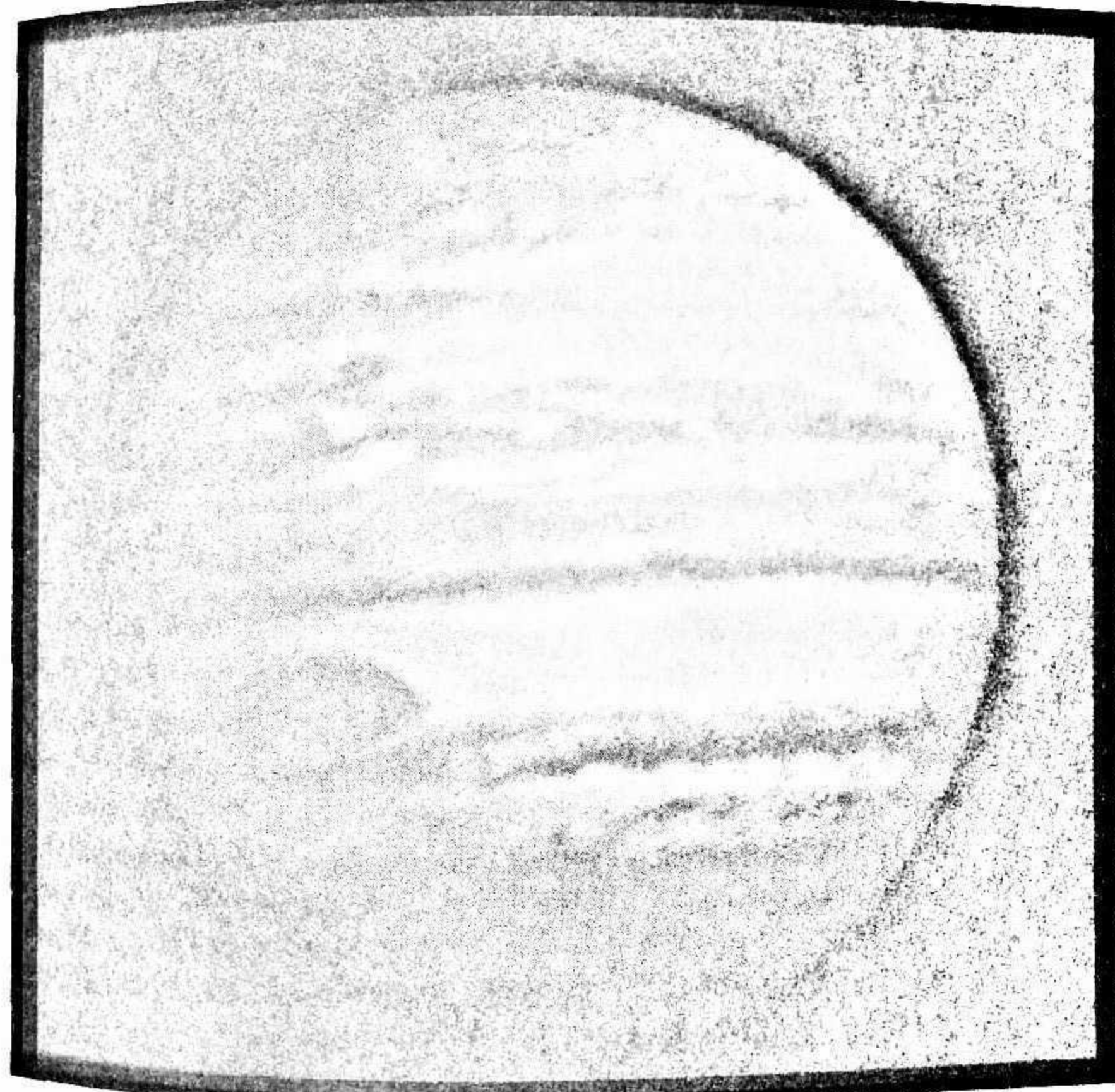
¿La explicación? En el cubo de reciclado

Por su lado, el Centro de Investigación Ames de la NASA estuvo a punto de tirar a la basura treinta años de datos por falta de presupuesto para su conservación, y solo la dedicación desinteresada de un ingeniero de Ottawa impidió que la información acabase en un contenedor de reciclado. Tras una improbable labor de búsqueda y reconstrucción arqueológica, los datos sobre la trayectoria de las Pioneer 10 y 11 consiguieron ser recuperados y la anomalía pudo ser



Sonda espacial Pioneer 10.

explicada: se trataba de radiación térmica anisótropa. Cuando un cuerpo está caliente, emite energía en forma de radiación térmica. Los generadores radioisotópicos de las Pioneer la emiten de forma anisótropa, es decir, con mayor intensidad en unas direcciones que en otras. El resultado neto es una deceleración minúscula que produce una desviación en la posición. En la actualidad ambas sondas continúan su viaje interestelar. La Pioneer 11 contactó con la Tierra por última vez en noviembre de 1995. Su compañera Pioneer 10 (en la imagen, una foto de Júpiter tomada por esta) consiguió transmitir telemetría hasta abril de 2002, tras una misión de más de treinta años; un récord de pervivencia espacial solo superado por las sondas Voyager, que aún siguen funcionando.



Júpiter fotografiado por la Pioneer 10 en diciembre de 1973.

gicamente más activo de todo el sistema solar, donde numerosos volcanes dispersan azufre y tiñen la superficie de brillantes colores.

Los anillos de Saturno (véase la imagen de las págs. 66 y 67) mostraron una nueva estructura interna compuesta por millares de pequeños anillos que, en realidad, se componen de pequeños fragmentos de roca; en torno a ellos, un conjunto de satélites «pastores» vuelan en una formación que mantiene estable la estructura del sistema de anillos. Muchas de las lunas saturnianas, como Mimas, Encélado, Tetis, Dione y Rhea, están cubiertas por hielo de agua. Con todo, la joya de la corona es Titán, un mundo más grande que Mercurio donde llueve metano y otros hidrocarburos líquidos, lo que lo convierte en uno de los lugares más interesantes para buscar vida basada en el carbono.

Durante su sobrevuelo de Urano en 1986, la Voyager 2 descubrió dos nuevas lunas, un campo magnético peculiar (su eje está inclinado 55° respecto al eje de rotación, y además está descentrado), midió vientos de más de 700 kilómetros por hora en la superficie del planeta y halló pruebas de un océano de agua a casi mil kilómetros bajo la capa de nubes. Neptuno reveló sorpresas similares: cinco nuevas lunas, vientos que rugen a casi 1 100 kilómetros por hora, abundante contenido de hidrógeno y cierta cantidad de metano que da al planeta su típico aspecto azulado. También se descubrió que los cuatro gigantes exteriores tienen un sistema de anillos, aunque solo el de Saturno tiene un tamaño que lo hace visible desde la Tierra.

Acabado el Grand Tour las Voyager 1 y 2 se dirigen al exterior del sistema solar, y puede que incluso hayan traspasado sus límites (según cuál sea la definición que uno haga de «límites»). En la actualidad ambas sondas continúan en funcionamiento, enviando información sobre el medio interplanetario e interestelar; pero su combustible nuclear se va agotando y llegará el momento en que sus señales de radio serán tan débiles que ni siquiera la Red de Espacio Profundo de la NASA podrá captarlas.

El éxito de las misiones Pioneer y Voyager en la exploración del sistema solar exterior es aún más sorprendente si se considera las limitaciones que impone un mero sobrevuelo. Recuerda a esos autobuses turísticos que nos permiten ver Londres o París

MENSAJES PARA LA ETERNIDAD

«Aquí los hombres del planeta Tierra pusieron el pie en la Luna por vez primera, julio 1969». Con estas palabras, una placa conmemorativa recuerda el primer alunizaje de la historia. Todas las misiones tripuladas del programa Apolo llevaron sus propias placas como símbolo de la voluntad del ser humano de perdurar. El ambiente espacial permite que los objetos puedan permanecer esencialmente inalterados durante miles de millones de años (cometas y asteroides son buena prueba de ello), y eso animó a la NASA a incluir mensajes en las Pioneer 10 y 11, las primeras sondas que escaparon a la influencia gravitatoria del Sol. Cada una de ellas lleva una placa de aluminio y oro anodizado con información sobre la ubicación de la Tierra y una representación de una pareja de humanos.

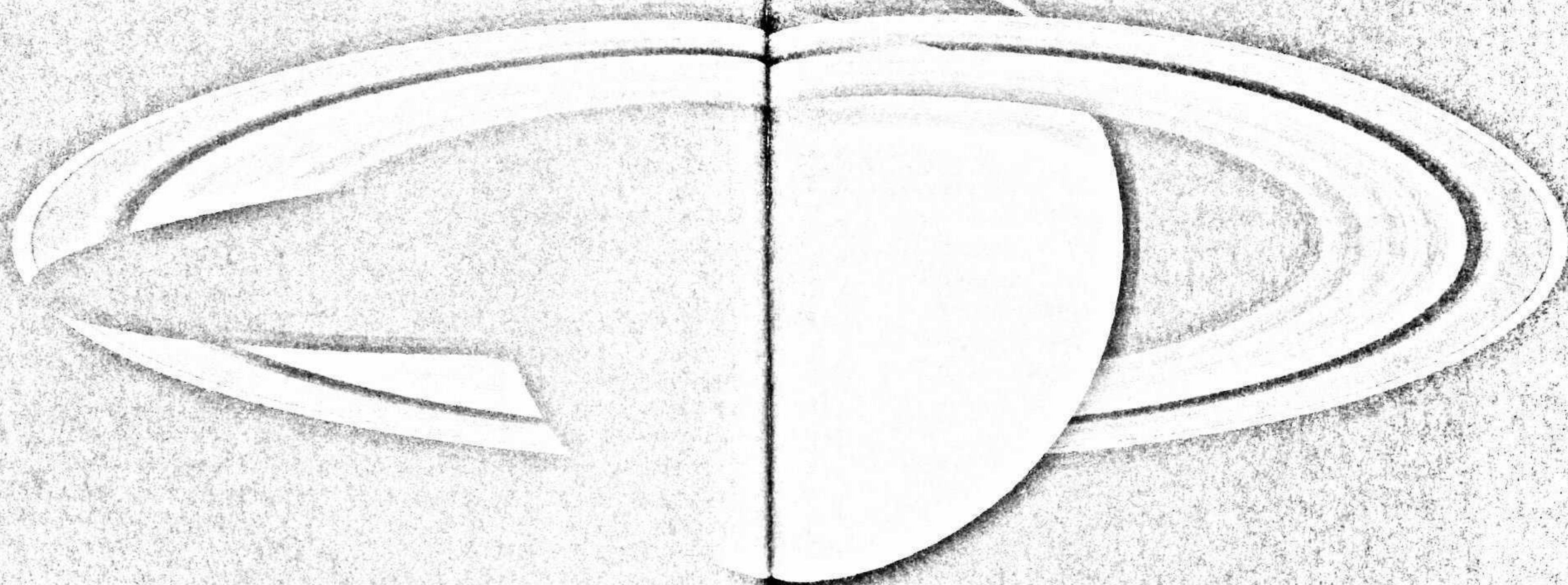
Un disco espacial

Pocos años después las sondas Voyager 1 y 2 despegaron con su propio mensaje, el llamado «disco dorado» (en la imagen). Se trata de un disco LP con muestras musicales, saludos en 55 idiomas y un conjunto de imágenes de nuestro mundo. La inmensidad del espacio hace prácticamente nula la posibilidad de que nuestros discos dorados sean alguna vez encontrados. Aun así, las placas de las Pioneer y Voyager son un recordatorio a nosotros mismos de nuestro deseo por ser recordados. Son mensajes en una botella que durarán más que la misma Tierra.

El disco «Sonidos de la Tierra» fue transportado al espacio por las sondas Voyager 1 y 2 en 1977. Se calcula que tardarán unos 40 000 años en alcanzar una de las estrellas más próximas al sistema solar, seguramente la Gliese 445, ubicada en la constelación Camelopardalis. Contiene música de todo tipo, desde Bach y Mozart a Chuck Berry y música navaja.



La imagen muestra el gigante anillado de Saturno, el sexto planeta del sistema solar. Sus anillos están compuestos por partículas rocosas.

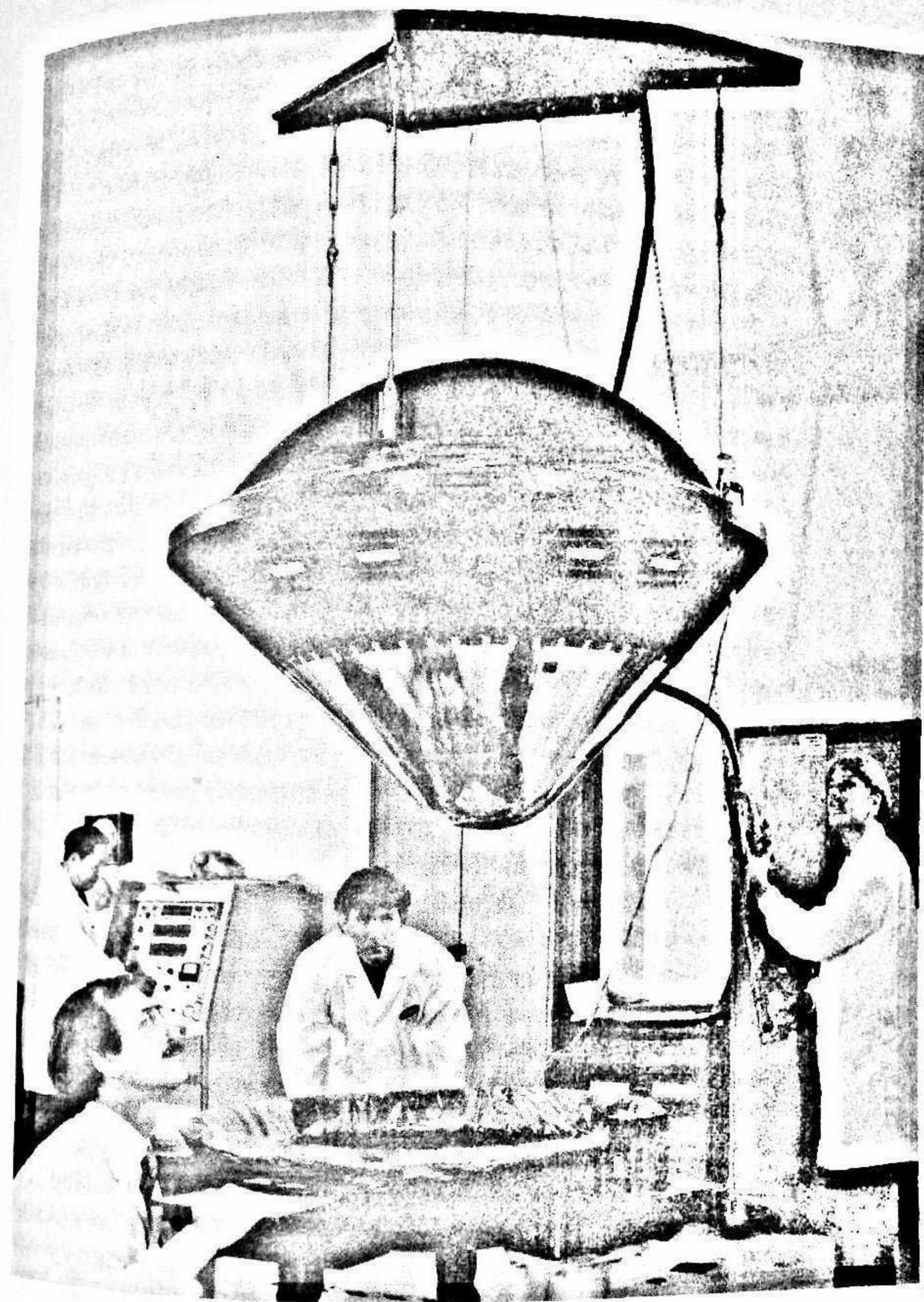


en un par de horas, algo interesante si no hay tiempo suficiente para nada más pero que, ciertamente, no puede compararse con una visita de varios días. Así pues, las siguientes misiones se planificaron como estancias más largas.

La siguiente nave exploradora del sistema Júpiter fue la Galileo (véase la imagen de la página contigua), hasta entonces uno de los proyectos más ambiciosos de la NASA. Lanzada en 1989, fue diseñada para estudiar la atmósfera del planeta, sus satélites y su entorno magnético durante casi dos años, periodo de tiempo que finalmente fue multiplicado casi por ocho (1989-2003) debido al excelente trabajo de construcción llevado a cabo por los ingenieros. Los dos últimos años, dentro del intenso cinturón de radiación de Júpiter, dañaron seriamente sus sistemas electrónicos pero no impidieron la continuación de la misión. Cuando su suministro de combustible para maniobrar tocaba a su fin, la NASA aprovechó una última oportunidad para obtener información y estrelló la Galileo contra Júpiter. Durante los cincuenta y ocho minutos que sobrevivió, la sonda pudo constatar la ausencia de agua o compuestos orgánicos en la atmósfera, y registró vientos cuya velocidad duplica a la del sonido en la Tierra (340 m/s).

Gracias a la misión Galileo, los planetólogos descubrieron helio en la atmósfera de Júpiter, fueron testigos de cómo el intenso vulcanismo de la luna Ío daba nueva forma a su superficie, detectaron el primer campo magnético en un satélite (Ganímedes), confirmaron la presencia de compuestos orgánicos en los cuatro satélites galileanos y, quizá lo más importante, hallaron evidencias de la presencia de agua bajo la superficie de la luna Europa, y no solo hielo, sino agua líquida. A modo de premio inesperado, en esa misión Galileo se encontró, por una feliz casualidad, en la posición adecuada para presenciar la muerte del cometa Shoemaker-Levy cuando los fragmentos del mismo se estrellaron contra Júpiter en julio de 1994.

Galileo marcó el camino a seguir a las futuras misiones a los gigantes exteriores, como la sonda espacial Juno, que llegó a Júpiter en julio de 2016 para descubrir su origen, evolución y estructura mediante un análisis en profundidad de sus campos gravitatorio y magnético, así como para aumentar nuestros cono-



La sonda Galileo de la NASA, conformada por una sonda y un orbitador, fue lanzada el 18 de octubre de 1989.

cimientos sobre la atmósfera jupiterina. Se espera que transmita información hasta al menos 2018, aunque el final de la misión dependerá del comportamiento de la sonda.

También Saturno ha sido explorado de forma similar a la realizada por Galileo y Juno en Júpiter. La misión Cassini/Huygens, un proyecto conjunto de la NASA y la ESA con participación de la Agencia Espacial Italiana, ASI, ha investigado el sistema de Saturno durante veinte años, un récord difícil de batir. Cassini es un orbitador que desde 1997 explora la atmósfera de Saturno, sus anillos y su sistema de satélites. Sus descubrimientos, tan sorprendentes como los de la Galileo en Júpiter, incluyen la existencia de un océano de agua bajo la superficie de Encélado (que nos recuerda al de Europa, en el sistema jupiterino) y, justo antes de terminar su misión, confirmó la existencia de actividad hidrotermal bajo su superficie, similar a la que se cree pudo propiciar la aparición de la vida en la Tierra primigenia. Huygens, por otro lado, es una sonda que en enero de 2005 realizó un aterrizaje suave en Titán, uno de los objetivos más interesantes debido a la presencia de compuestos orgánicos en su superficie.

La combinación de las mediciones *in situ* de Huygens y las observaciones a distancia de Cassini (que incluyó entre sus instrumentos un sofisticado radar de apertura sintética) ha permitido a los científicos hacerse una imagen muy detallada de las condiciones en Titán. Las imágenes que transmitió muestran una gran cantidad de metano que, en forma líquida y de hielo, esculpe paisajes anaranjados cubiertos por neblinas de vapor. Los mares de metano albergan misteriosas islas que aparecen y desaparecen que, según las últimas teorías, podrían ser burbujas gigantes de nitrógeno.

La superficie se asemeja a la del desierto, incluyendo dunas que se extienden a lo largo de centenares de kilómetros, aunque en Titán los granos de «arena» están formados por hielo de agua recubierto de hidrocarburos. Las nubes producen lluvias de metano y etano líquidos, y la atmósfera muestra una gran variedad de hidrocarburos entre los que se encuentran sustancias como el propileno (fabricado en la Tierra para producir plástico) y el venenoso cianuro de hidrógeno. Bajo la superficie se esconden océanos compuestos de agua y amoníaco líquido.

Dado que algunas lunas como Encélado, Europa, Ganímedes y Titán tienen océanos de agua y cuentan con condiciones para desarrollar vida, no es de extrañar que la comunidad científica esté deseando enviar allí nuevas expediciones. La NASA y la ESA tienen varios proyectos en diversas fases de desarrollo, que van cambiando según las disponibilidades presupuestarias y las veleidades de sus respectivos Gobiernos. Una de las propuestas más radicales pasa por la construcción de un submarino en forma de calamar para la exploración del océano de Europa. Otros planes incluyen el envío de una misión triple a Titán compuesta por un orbitador, un aterrizador y un globo que flotaría por la atmósfera sin rumbo fijo.

La extensa cobertura científica que Júpiter y Saturno han recibido (y que sin duda merecen) contrasta con la escasa atención prestada a Urano y Neptuno, sus hermanos menores en la familia de los gigantes exteriores. Buena parte de lo que sabemos sobre ellos se limita a la breve exploración de sobrevuelo realizada por la sonda Voyager 2 a finales de los ochenta. La lejanía de ambos planetas ha hecho que la exploración de los gigantes gaseosos se haya centrado en Júpiter y Saturno, relegando a los otros dos planetas exteriores al olvido.

Eso no significa que la exploración de Urano y Neptuno sea de importancia menor. Al contrario, ambos planetas son únicos y distan mucho de ser meros jupíteres en miniatura. La exploración de planetas extrasolares nos permite ahora saber de la existencia de «gigantes helados», mundos intermedios entre los cuerpos rocosos tipo Tierra y los leviatanes gaseosos tipo Júpiter; tanto Urano como Neptuno encajan en ese molde. Su estudio permitiría conocer detalles sobre el origen del sistema solar y la formación de planetas.

A pesar de ello, los requisitos técnicos y presupuestarios son grandes y los planes actuales no parece que vayan a pasar de la etapa de concepto salvo que haya un compromiso político a largo plazo, ya que los posibles tiempos de vuelo se miden en décadas. La NASA, por mandato del Congreso estadounidense, está desarrollando planes para una misión doble Urano/Neptuno pero, a pesar de su importancia científica, tendrá que competir

con objetivos de alta prioridad científica, como Marte, Júpiter y Saturno. Todo parece indicar que los gigantes helados más alejados permanecerán al margen de la exploración del sistema solar durante mucho tiempo.

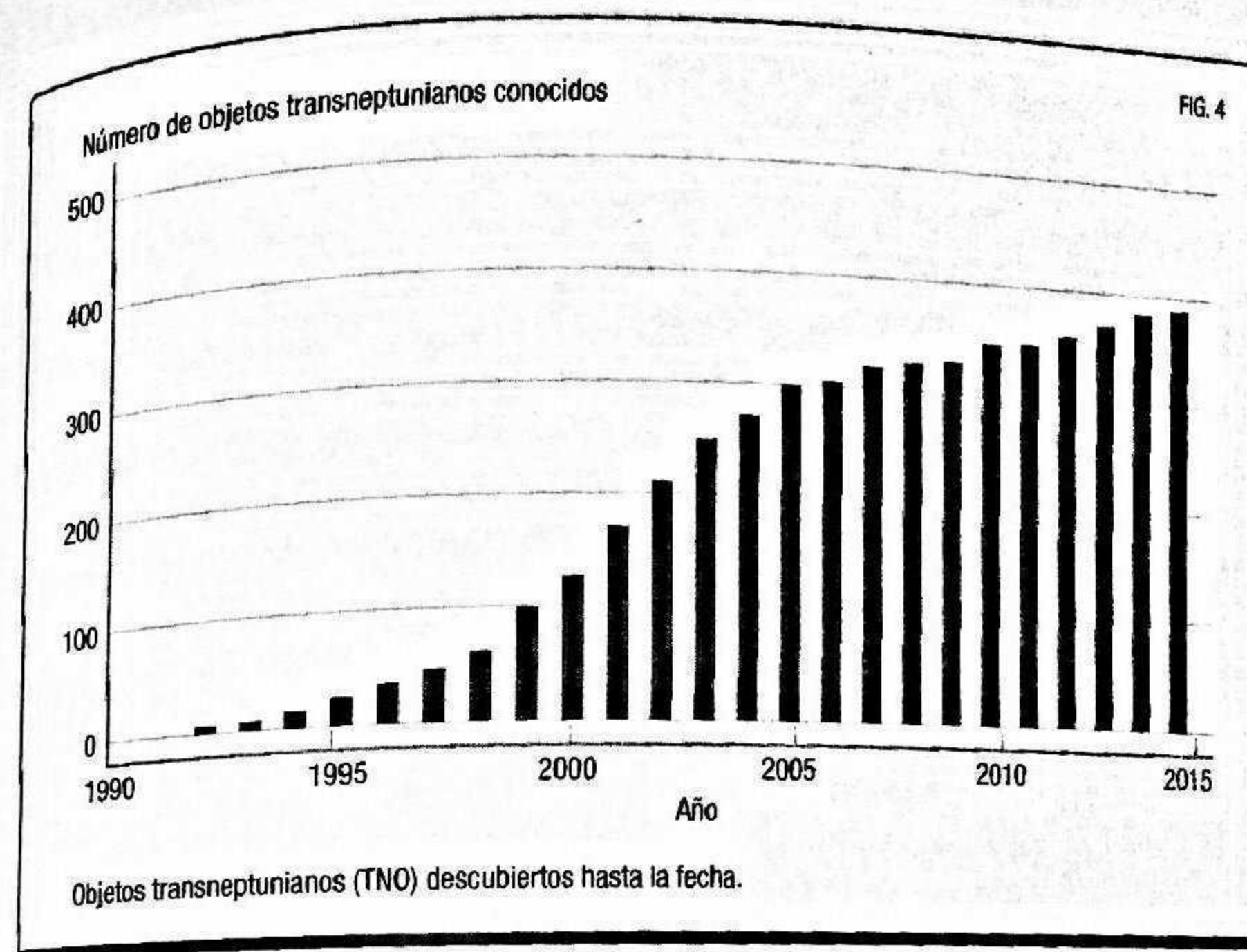
ECHANDO UN VISTAZO A LOS CUERPOS MENORES

Si bien los planetas y sus satélites merecen ser estudiados, no son por supuesto los únicos cuerpos del sistema solar dignos de atención. Alrededor del Sol gira un conjunto de subplanetas y cuerpos menores, y algunos de ellos prácticamente no han cambiado desde que la nube primigenia se condensó para dar forma a los planetas.

En primer lugar tenemos a Plutón. Durante mucho tiempo se le consideró un planeta a pesar de que sus características eran atípicas, comenzando por su escaso tamaño, inferior al de nuestra propia Luna. Durante los años noventa se descubrieron cuerpos similares a Plutón más allá de su órbita, lo que abrió el debate sobre si estos también deberían ser considerados como planetas. Tras amplias deliberaciones se decidió en contra, y Plutón perdió su estatus de planeta en 2006. Sin embargo, pasó a ser el adalid de un nuevo grupo de cuerpos, los objetos transneptunianos (en la figura 4, relación temporal de descubrimientos de los TNO desde principios de los años noventa), que giran en el lejano cinturón de Kuiper, a miles de millones de kilómetros del Sol (figura 5).

La lejanía de estos objetos y su reducido tamaño hace que, incluso bajo los más potentes telescopios, aparezcan como débiles puntos de luz, convirtiendo una exploración espacial en algo imprescindible. La mejor oportunidad de realizar un sobrevuelo de Plutón se dio cuando la Voyager 1 fue lanzada hacia los planetas exteriores pero, finalmente, se decidió cambiar su trayectoria para que pudiese investigar la luna Titán y la ocasión se perdió.

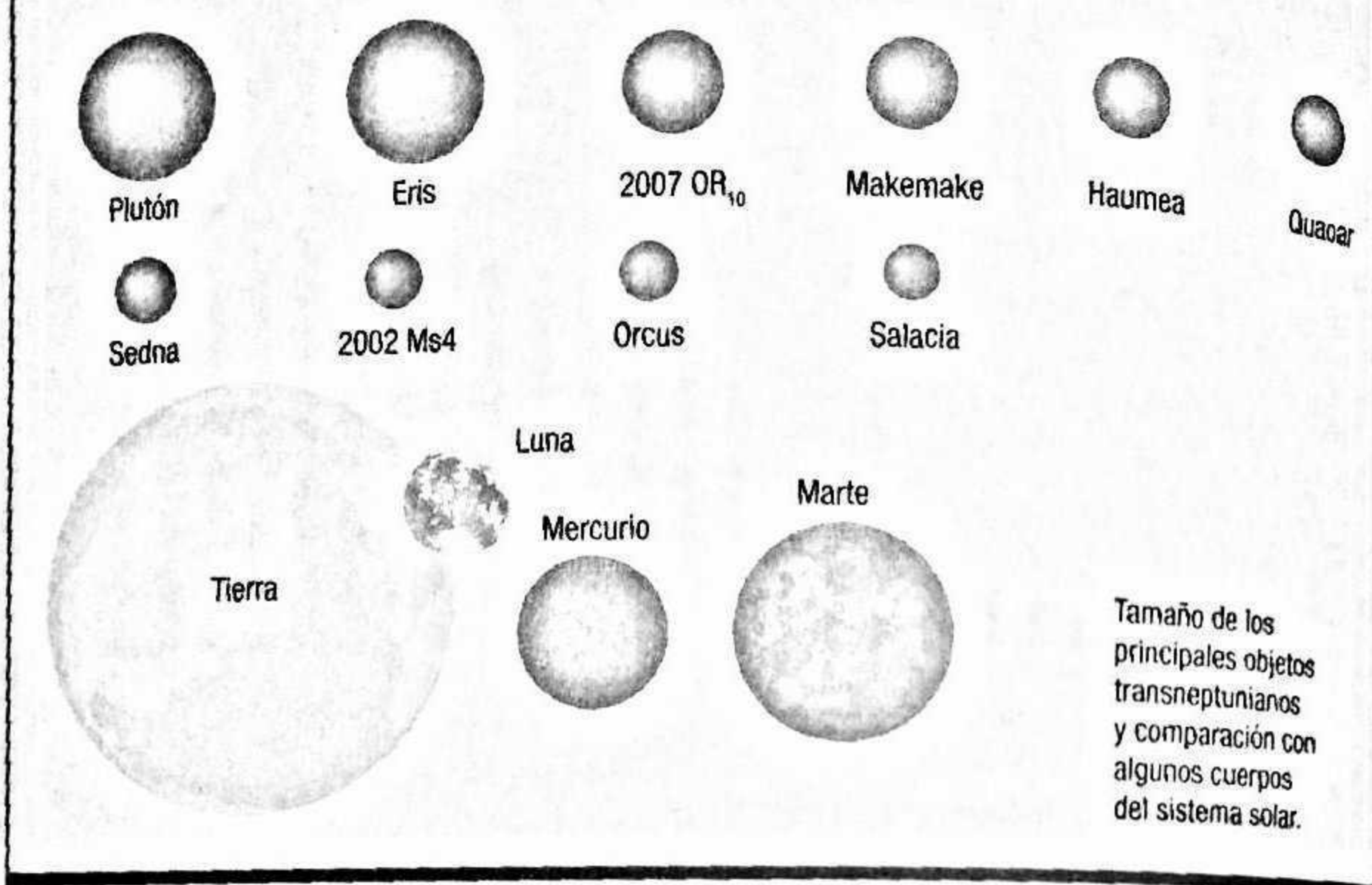
La NASA tuvo que esperar hasta enero de 2006 para poder lanzar la New Horizons en dirección a Plutón. La misión se vendió como la oportunidad para completar la exploración de todos los planetas, así que resulta irónico que, solo siete meses des-



pues del despegue, Plutón fuese desposeído de su estatus planetario. Objetivamente no importó mucho, porque no se trataba realmente de explorar un planeta sino un miembro del cinturón de Kuiper. Tras un vuelo de nueve años, en julio de 2015 la New Horizons realizó un sobrevuelo de Plutón y uno de sus satélites, Caronte. La velocidad de la sonda limitó la exploración a un mero sobrevuelo, pero fue más que suficiente para cambiar por completo nuestros conocimientos sobre el objeto anteriormente conocido como planeta.

Ahora sabemos que Plutón (en la imagen superior de la pág. 75), lejos de ser un cuerpo inerte, cuenta con un paisaje de impresionantes montañas de hielo cuya juventud hace creer que son renovadas continuamente. Una planicie bautizada como Sputnik, dos veces más extensa que la península Ibérica, contiene el mayor glaciar de todo el sistema solar, formado de nitrógeno congelado. A su alrededor, picos de más de 3500 m se elevan de la superficie merced a procesos que todavía no se comprenden bien y que no se

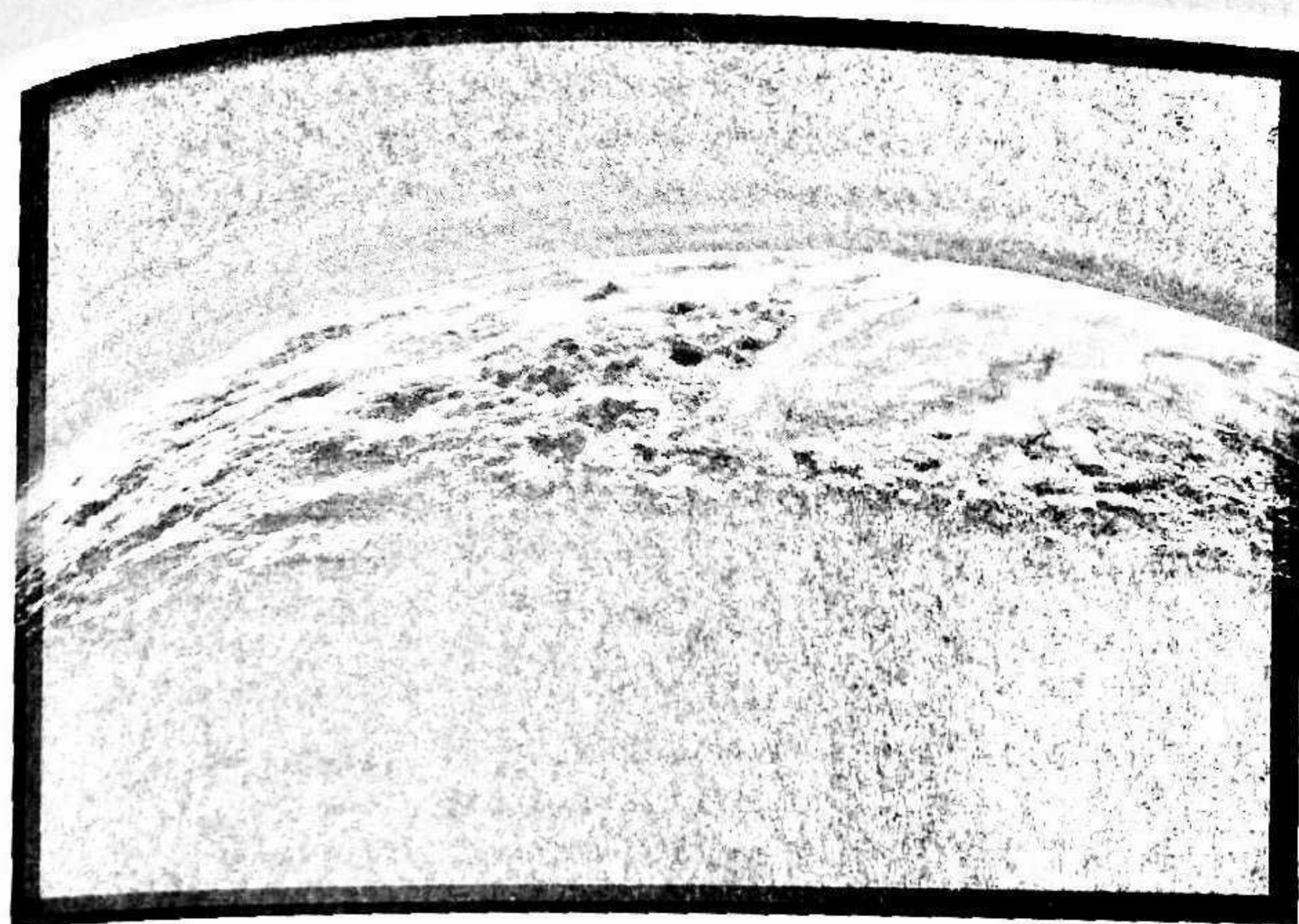
FIG. 5



creían posibles en un mundo de ese tamaño; algunos de ellos forman auténticos icebergs flotando en un mar de nitrógeno líquido.

Se sospecha que puede incluso existir un océano de agua líquida bajo la superficie, la cual puede contener criovolcanes que lancen al aire chorros de agua en lugar de lava. La atmósfera, muy tenue pero detectable, contiene nubes de nitrógeno gaseoso con moléculas orgánicas en suspensión, y todo parece indicar que el ambiente de Plutón tiene un «ciclo de nitrógeno» similar al ciclo del agua en la Tierra.

Su satélite Caronte ha comenzado a desvelar sus propios secretos, como la existencia de un conjunto de profundos cañones de más de mil kilómetros de longitud y casi diez de profundidad, así como indicios de avalanchas de hielo en diversas regiones de su superficie. Terminado el sobrevuelo del sistema Plutón, la New Horizons fue desviada ligeramente para poder examinar un segundo objeto transneptuniano llamado 2014 MU69, adonde llegará en enero de 2019.



Si la sonda New Horizons de la NASA permitió obtener fotos de Plutón (arriba), el cometa Churyumov-Gerasimenko (sobre estas líneas) fue el objetivo de la sonda Rosetta de la ESA.

Un segundo conjunto de cuerpos menores del sistema solar lo forman los asteroides, cuerpos planetarios menores con tamaños que oscilan entre un metro y un millar de kilómetros. La mayoría de ellos orbitan en el cinturón de asteroides, entre Marte y Júpiter, y su importancia científica radica en el hecho de ser restos que apenas han sufrido alteraciones desde su formación hace 4600 millones de años. Son cápsulas del tiempo flotantes que permitirían conocer las condiciones de nuestro sistema solar durante su creación.

La sonda Galileo hizo un breve sobrevuelo a los asteroides Gaspra e Ida durante su camino a Júpiter a comienzos de los años noventa, pero se trató de un objetivo secundario. La primera misión específicamente diseñada para explorar un asteroide fue la NEAR, de la NASA. Tras sobrevolar el asteroide Matilda en 1997, la sonda se colocó en órbita alrededor del asteroide Eros y lo examinó durante un año entero gracias a un conjunto de instrumentos entre los que figuraba un espectrómetro de rayos X y gamma, un magnetómetro, una cámara multispectral y un medidor láser para determinar distancias con precisión. Entre otras cosas, sabemos que el asteroide es un cuerpo compacto con forma de patata, y que su superficie muestra las señales de cráteres de impacto de todo tipo de tamaños.

Tras su misión, la NEAR cayó de forma suave convirtiéndose en la primera sonda que realizó un aterrizaje suave sobre la superficie de un asteroide y, aunque no se creía que sobreviviría al impacto, lo cierto es que continuó enviando información sobre la superficie durante las siguientes dos semanas. La misión demostró la viabilidad de tomar tierra en la superficie de un asteroide, y las siguientes sondas incluyeron módulos de aterrizaje. Después de todo, el débil campo gravitatorio de un asteroide permite una aproximación controlada a baja velocidad, reduciendo los riesgos de colisión y el posible daño a los instrumentos científicos.

Los responsables de mostrar que ello era posible fueron unos recién llegados en la exploración espacial interplanetaria: los japoneses. En septiembre de 2005 la sonda Hayabusa llegó al asteroide Itokawa y, tras una primera fase de observación a distancia, se acercó lentamente hasta que tocó su superficie.

En este caso la sonda no permaneció más que unos segundos sobre Itokawa, ya que su misión consistió en establecer un leve contacto sobre su superficie y separarse de inmediato. Mediante esa maniobra la Hayabusa consiguió recuperar muestras del asteroide con una masa aproximada de un gramo que, tras efectuar un viaje de vuelta, fueron recogidas y analizadas, encontrándose minerales ya conocidos en la Tierra como olivino y plagioclasas. No menos importante, la misión demostró la validez de un nuevo tipo de motor iónico capaz de proporcionar un empuje pequeño pero duradero, ideal para misiones de larga duración.

El éxito de la Hayabusa (a pesar de los fallos que estuvieron a punto de dar al traste con la misión) propició una segunda parte y, en el momento de escribir este libro, la Hayabusa 2 se dirige al asteroide Ryugu, donde llegará en junio de 2018. Incorpora un aterrizador y tres pequeños rover, y se espera que pueda también devolver muestras a la Tierra. Este asteroide es de tipo C, compuesto por arcillas y silicatos, y se cree que en su composición aparecerá cierto contenido de agua y sustancias orgánicas.

Por su parte, Estados Unidos construyó la sonda Dawn con el objetivo de explorar los dos mayores asteroides conocidos, Ceres y Vesta. En 2018 la sonda OSIRIS-REx llegará al asteroide Bennu, donde se espera lleve a cabo una misión de recuperación de muestras similar a la de los Hayabusa. La ciencia dispondrá entonces de los medios para determinar cuál fue la composición y estructura de los materiales que formaron nuestro sistema planetario, auténticas reliquias intactas de tiempos pasados.

Queda un tercer grupo de cuerpos menores a los que prestar atención: los cometas. Conocidos desde la antigüedad, su presencia en los cielos fue siempre presagio de desastres de todo tipo. En un cielo donde los cuerpos celestes se movían de forma regular y conocida los cometas eran elementos impredecibles, apareciendo y desapareciendo de forma caprichosa.

Hoy sabemos, por el contrario, que los cometas son cuerpos con órbitas tan conocidas como las de los planetas. Edmund Halley fue el primero en darse cuenta de que tres cometas observados en el pasado eran realmente el mismo, lo que le llevó a predecir su vuelta en 1759. Halley falleció en 1742 y no pudo

ser testigo de ello, pero acertó y, por ello, el cometa en cuestión lleva su nombre.

Según el modelo popular (que no enteramente exacto) de «bola de nieve sucia», los compuestos helados de la superficie del cometa se subliman al acercarse al Sol y calentarse. La nube de partículas que emite al espacio reacciona frente a la presión de la radiación solar convirtiéndose en una o varias colas que pueden extenderse a lo largo de millones de kilómetros.

A pesar de su gran tamaño aparente, en realidad son cuerpos pequeños. Suelen orbitar en la llamada nube de Oort, más allá de la órbita de Neptuno. Ocasionalmente, las perturbaciones gravitacionales de otras estrellas lanzan algunos de ellos hacia el interior del sistema solar, donde pueden quedar retenidos en órbitas de corto periodo. Se trata, por tanto, de otro ejemplo de cápsula del tiempo que puede proporcionar información sobre la formación de nuestro sistema planetario.

El cometa Halley proporcionó a los científicos una oportunidad para examinarlo desde el espacio durante su visita de 1985-1986. La ESA envió la Giotto, una sonda que se acercó a menos de 600 kilómetros del núcleo del cometa, tan cerca que hubo que equiparla con un escudo especial para protegerla de las partículas de polvo procedentes de la cola cometaria. La URSS, en colaboración con Francia, envió las Vega 1 y Vega 2 que, tras una exploración de Venus, sobrevolaron el cometa. Japón, por primera vez en su historia, lanzó una sonda interplanetaria, la Sakigake, seguida por la Suisei. En total, cinco sondas de última tecnología conocidas conjuntamente como la «Armada Halley» destinadas a explorar el cometa más famoso de todos los tiempos.

La información transmitida desde el espacio mostró un cuerpo de unos quince kilómetros de longitud con forma de cacahuete. Se confirmó la hipótesis de la bola de nieve sucia, aunque lo oscuro de la superficie del cometa sugirió que se acerca más a una bola de suciedad con nieve. El cometa emite chorros compuestos en su mayor parte de vapor de agua, con cantidades menores de monóxido de carbono, metano, amoníaco y otros hidrocarburos. El análisis de los elementos del cometa mostró

una composición similar a la del Sol, lo que refuerza la hipótesis de que se formó hace al menos 4 500 millones de años.

Hasta el día de hoy solamente ha habido una recogida de muestras de un cometa para su estudio en la Tierra. Se trató del cometa Wild-2, que en 2006 recibió la visita de la sonda norteamericana Stardust. Al sobrevolar el cometa la sonda recogió algunas partículas en un aerogel, que posteriormente fue lanzado a la Tierra en una cápsula protegida. Poco antes, en 2005, la sonda Deep Impact chocó contra el cometa Tempel 1, produciendo un cráter de cien metros de diámetro. El análisis del material expulsado durante la colisión mostró evidencias de hielo de agua, con un alto contenido en polvo.

Finalmente (por ahora), la ESA exploró el cometa Churyumov-Gerasimenko (véase la imagen inferior de la pág. 75) en 2014 mediante la combinación del orbitador Rosetta y el aterrizador Philae. A pesar de algunos problemas durante el aterrizaje, la misión se vio coronada con éxito. Los datos transmitidos contradicen en parte el modelo de la simple bola de suciedad con hielo, ya que mostraron un cuerpo con actividad geológica compleja y con un campo magnético oscilante. El contenido de deuterio (un isótopo de hidrógeno) sugiere que los cometas se crearon a distancias del Sol mucho más variables de lo que se creía hasta entonces, y la composición del agua encontrada en su superficie pone en cuestión las hipótesis que sitúan el origen del agua terrestre en los cometas.

Sin duda, los cuerpos menores han revolucionado nuestras hipótesis sobre el origen y la formación del sistema solar, y todo indica que continuarán haciéndolo gracias a las futuras misiones espaciales no tripuladas.

Astrofísica y cosmología

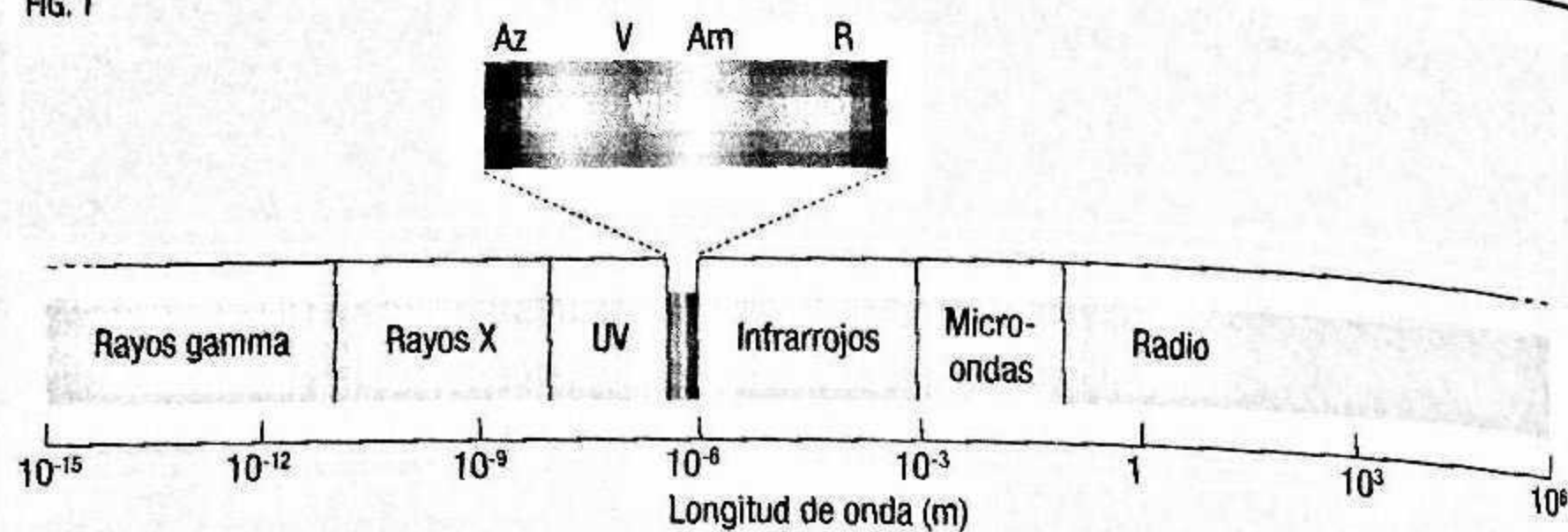
A modo de «ventanas», la instalación de observatorios en el espacio proporciona a los astrofísicos una forma nueva y muy valiosa de sondear el cosmos. Sea en infrarrojos, ultravioleta, rayos X o gamma, los científicos buscan datos para mejorar las teorías de formación planetaria, estelar y galáctica.

Una de las ramas de la astronomía más útiles para el estudio de los astros es la radioastronomía, centrada en el estudio de las ondas electromagnéticas de más de diez centímetros de longitud, las ondas de radio. Estas ondas pueden penetrar en el interior de nubes de polvo y atravesar enormes distancias sin sufrir atenuación apreciable, lo que las convierte en una forma eficaz de sondear el universo.

Los radiotelescopios de ondas centimétricas son grandes platos parabólicos de, en ocasiones, centenares de metros de diámetro; los de ondas métricas constan de millares de elementos y se extienden en grandes extensiones de terreno. LOFAR (por *Low-frequency Array*) abarca un área de un tercio de kilómetro cuadrado en los Países Bajos y otros países, LWA (*Long Wavelength Array*) consta de 13568 antenas agrupadas en 53 estaciones que se extienden en una región de más de 400 kilómetros de diámetro en Nuevo México (EE. UU.), y superando a todos ellos, el SKA (*Square Kilometre Array*) es tan extenso que una mitad se encuentra en Sudáfrica y la otra mitad en Australia.

Los dispositivos que forman tan extensos radiotelescopios son estructuras sencillas, en ocasiones poco más que postes me-

FIG. 1



Este espectro electromagnético muestra las ondas ordenadas de menor a mayor longitud. En el centro, el espectro visible es clasificado por colores (azul, verde, amarillo, rojo).

táticos anclados al suelo, y ningún sistema espacial puede competir en facilidad de instalación y mantenimiento, por no hablar de precio. Sin embargo, para longitudes de onda superiores a treinta metros (en la figura 1 las distintas ondas representadas en el espectro) la atmósfera terrestre resulta opaca, y en el rango de 10-30 metros hay muchas interferencias debidas a la actividad humana. Si queremos ver a través de esa «ventana», un dispositivo basado en el espacio es esencial.

LO QUE NOS CUENTAN DETERMINADAS ONDAS

¿Qué se puede descubrir a longitudes de onda tan largas? Los astrofísicos apuntan varias posibilidades: se pueden sondear las condiciones del universo primitivo, realizar reconocimientos extragalácticos y descubrir el origen de los rayos cósmicos. La información obtenida también podría complementar a la proporcionada por otros instrumentos en campos como el estudio de la actividad solar, las magnetosferas de los planetas gigantes de nuestro sistema solar o las estructuras a gran escala de los cúmulos de galaxias.

La NASA realizó un primer intento con la sonda RAE-B. Lanzada y ubicada en órbita lunar en 1973, podía extender una antena formada por cuatro varillas de 229 metros de longitud. Fue una

prueba interesante pero, al ser un sistema de antena única, carecía de sensibilidad y resolución.

Resulta difícil considerar la posibilidad de ensamblar radiotelescopios de centenares de metros, o aun de kilómetros. Con todo, hay una salida: si tomamos dos detectores y los separamos una distancia D , sus señales pueden combinarse para dar una observación equivalente a la de un solo detector con un diámetro D . Es decir, basta con construir elementos captadores pequeños, separarlos y obtener el equivalente a una gran estructura. Es lo que se conoce como *radiointerferometría*.

Existen diversos proyectos para ubicar radiointerferómetros en el espacio:

- DARIS (*Distributed Aperture Array for Radio Astronomy in Space*) es una iniciativa de la Agencia Espacial Europea (ESA). Consiste en una flota de 6 a 8 sondas, equipadas con antenas bipolares de 5 metros de longitud, que se extenderá a lo largo de cien kilómetros permaneciendo en reposo relativo. Podría construirse con la tecnología actual y establecerse en órbita lunar.
- FIRST Explorer. Incluye un total de seis naves, que se ubicarán en el punto de Lagrange L2 (posición de la órbita en la que un cuerpo pequeño permanece estacionario respecto a dos cuerpos más grandes). Una séptima nave se encargará del procesamiento de datos y las comunicaciones.
- SURO (*Space-based Ultralong Wavelength Radio Observatory*) es otra propuesta de la ESA, una solución de bajo coste y mantenimiento formada por una constelación de nueve sondas en total.
- OLFAR (*Orbiting Low Frequency ARray*) explorará la posibilidad de utilizar múltiples sondas pequeñas, de 1-10 kilogramos de masa, y combinarlas para formar un gran radiotelescopio virtual.

Una de las propuestas más innovadoras consiste en el uso de pequeños minisatélites (CubeSats) unidos por cables. El sistema PACKSAT, propuesto por investigadores de la Universidad Es-

CUBESAT: PEQUEÑOS SATÉLITES EN FORMA DE CUBO

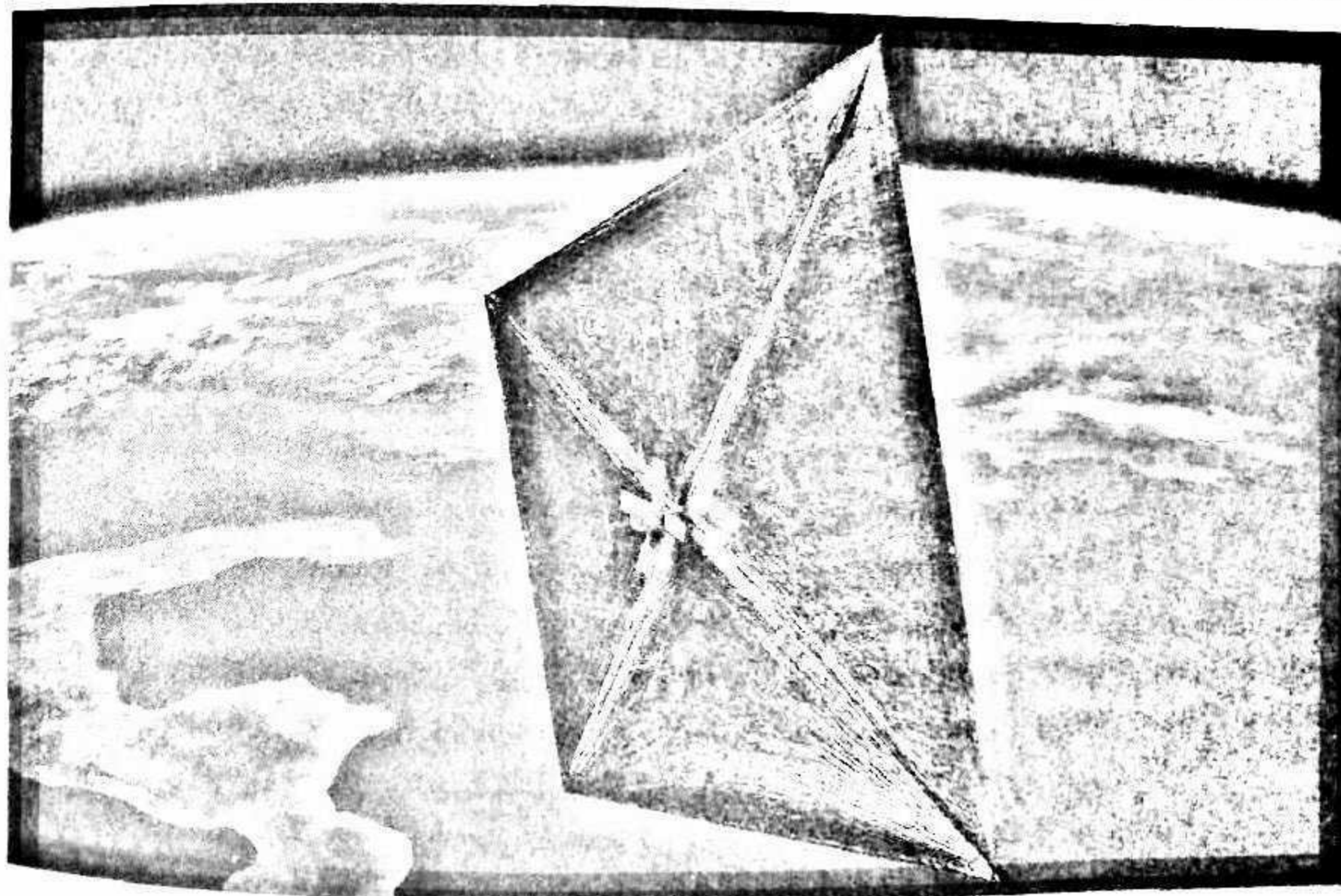
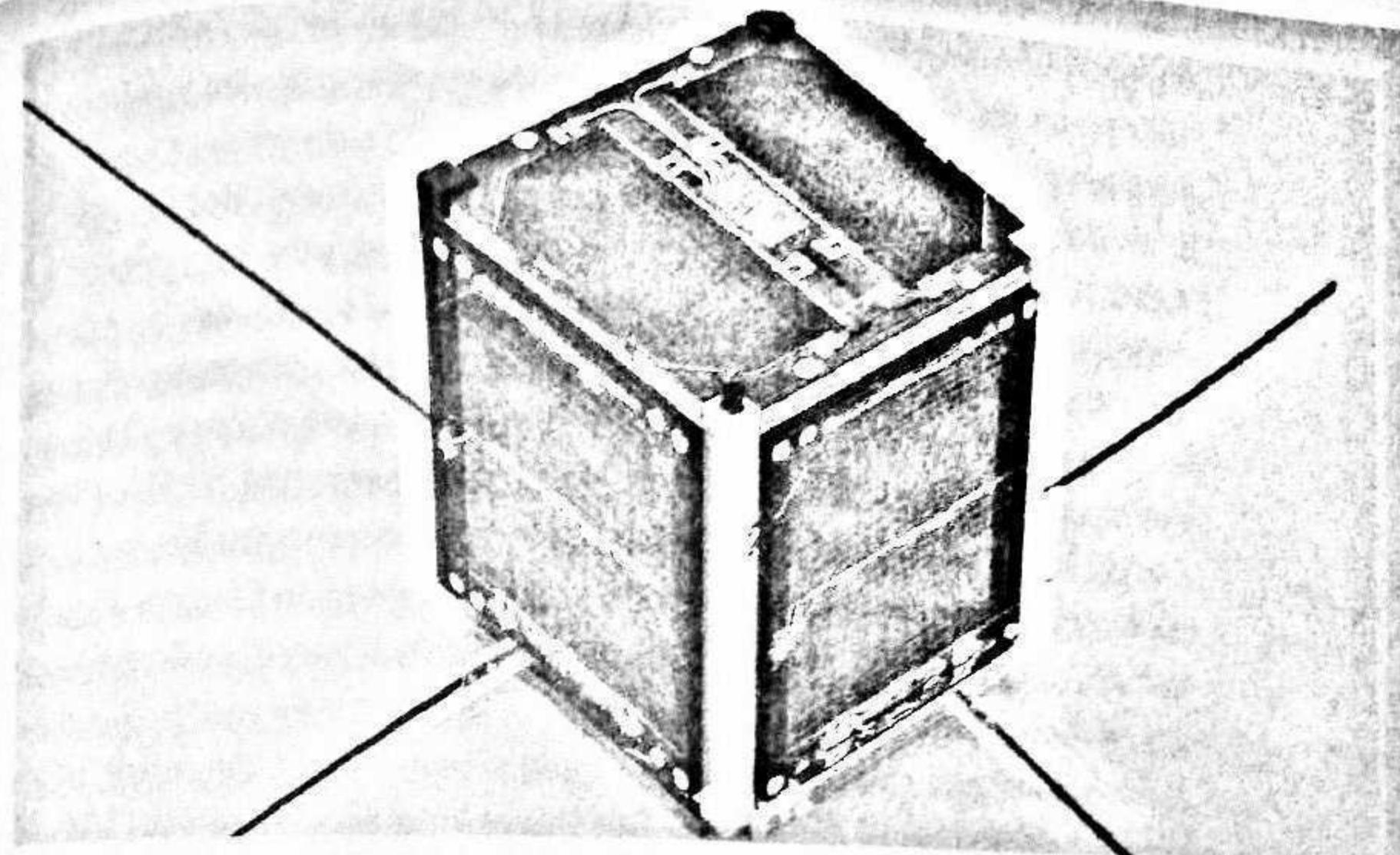
Los vehículos espaciales, sean satélites en órbita baja o sondas de exploración planetaria, son instrumentos muy caros y complejos, y su construcción puede extenderse durante más de una década. En 1999 las universidades de Stanford y Politécnica Estatal de California propusieron un estándar para un «nanosatélite» fácil de construir y cuya unidad básica es un cubo de diez centímetros de lado. La idea original era hacer posible que los estudiantes pudieran probarlos en el espacio para sus experimentos. Los conocidos como CubeSats (en las fotografías, dos ejemplos de estos satélites cúbicos) constituyen una plataforma ideal para aplicaciones de baja tecnología que no precisan de grandes instrumentos. Suelen utilizar tecnología probada de bajo coste y su masa ronda el kilogramo. La configuración estándar es la 1U, correspondiente a un cubo único, pero pueden unirse un número n de ellos para lograr configuraciones más complejas llamadas nU .

Los primeros CubeSats

Los siete primeros CubeSats fueron lanzados por un cohete ruso en 2003, y entre ellos se encontraban un detector de terremotos de la Universidad de Stanford (3U) (Palo Alto, California) y dos satélites para comunicaciones con radioaficionados (1U). Su bajo coste y facilidad de construcción los han convertido en herramienta para multitud de universidades y centros de investigación. Libertad-1, por ejemplo, fue construido en la Universidad Sergio Arboleda de Bogotá y en 2007 se convirtió en el primer satélite colombiano. Otras entidades se han convertido en exploradoras del espacio gracias a los Cubesats. La Planetary Society, una asociación sin ánimo de lucro, desarrolló el proyecto LightSail para demostrar que una nave interplanetaria puede propulsarse y dirigirse mediante la presión de la radiación solar. Aunque el primer CubeSat no alcanzó el éxito debido a fallos de hardware y software, el bajo coste de la operación permitió construir un segundo prototipo y volver a intentarlo.

Pequeños, baratos y encajables

Puesto que un CubeSat es pequeño y ligero, puede aprovechar el espacio sobrante en lanzamientos de satélites más grandes y, en consecuencia, el precio de lanzarlo es bastante menor. Algunos de ellos se llevan a la Estación Espacial Internacional aprovechando los vuelos de aprovisionamiento y, desde allí, son expulsados al espacio gracias a un brazo robótico. Otra opción consiste en utilizar un solo lanzador para enviar una gran cantidad de nanosatélites. En febrero de 2017, la Agencia Espacial India utilizó un cohete PSLV-XL para lanzar el satélite de observación Cartosat 2D y un total de 103 CubeSat de un solo golpe; la mayoría de ellos eran satélites de una empresa estadounidense cuyo objetivo era tomar imágenes de la Tierra pero también había CubeSats de Israel, Emiratos Árabes Unidos, Suiza y Kazajistán. El coste total de lanzamiento por CubeSat rondó los 7500 euros, el precio de un pequeño utilitario. Pero la mayor parte de proyectos se hacen en el ámbito universitario. Muchos de ellos, con el apoyo de agencias como la NASA y la ESA, lo que redunda en una gran experiencia para los estudiantes.



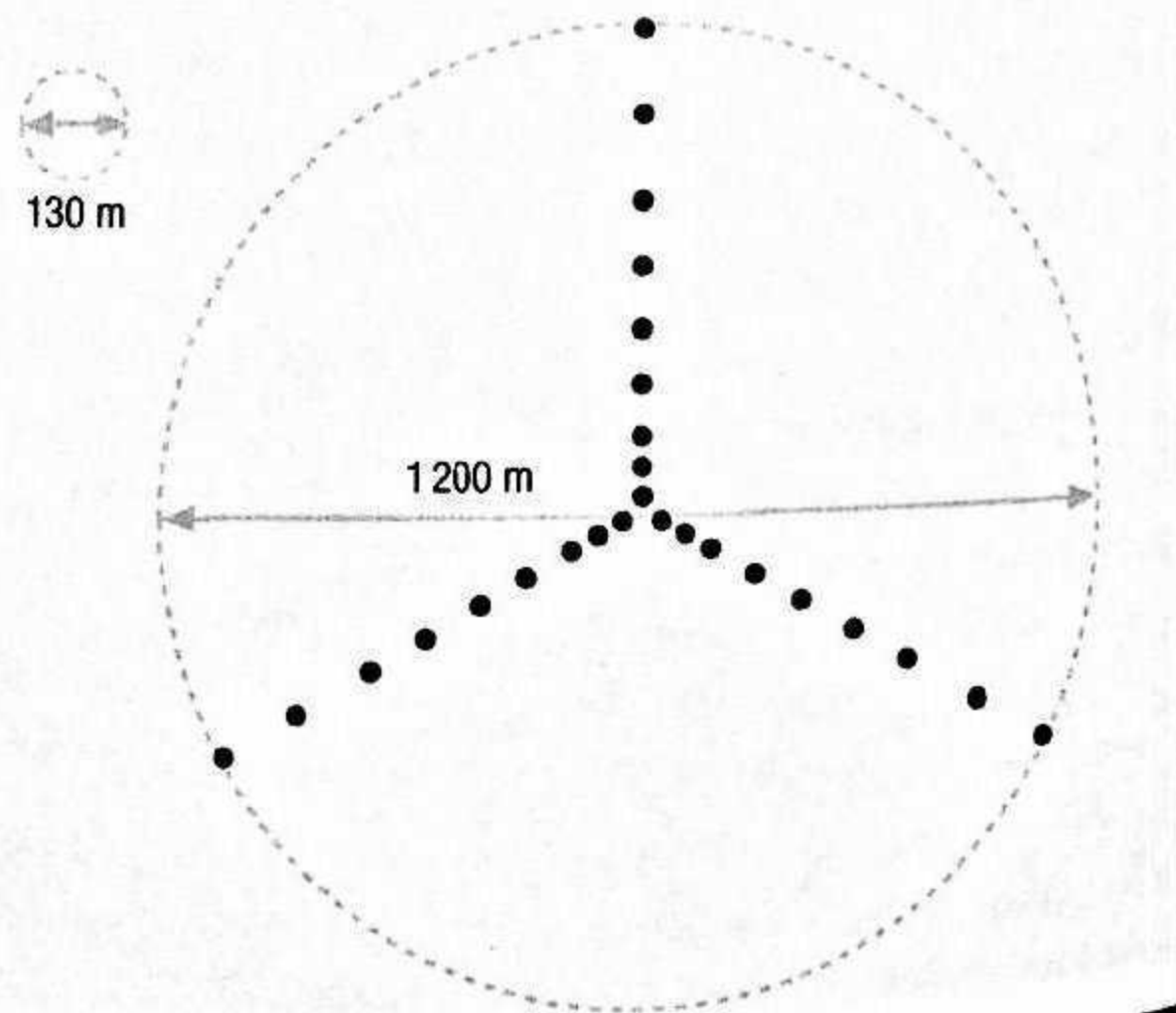
Arriba, el FUNCube 1, un nanosatélite CubeSat británico diseñado para involucrar a los más jóvenes en la ciencia relativa a la radio, el espacio y la física. Abajo, el NanoSail-D, una vela solar de 9 metros cuadrados diseñada por la NASA y que cabe en un CubeSat 3U.

tatal de Carolina del Norte, en Estados Unidos, se extendería a lo largo de más de cien kilómetros en el espacio, permitiendo la recepción de imágenes detalladas a un coste muy inferior al de una misión convencional.

Además de permitir la exploración de zonas del espectro electromagnético de radio opacas a la superficie terrestre, los satélites radioastronómicos pueden ayudar a mejorar las observaciones en tierra. El secreto está en la interferometría: cuanto más lejos se encuentren dos radiotelescopios, mayor será la resolución de la imagen. En Estados Unidos, el sistema VLBA (*Very Long Baseline Array*) del observatorio astronómico *Very Large Array* (VLA) combina señales de radiotelescopios (figura 2) cuya máxima separación (también llamada *línea base*) puede superar los 8600 kilómetros.

La radioastronomía mediante interferometría de muy larga base ha conseguido resultados en tierra que rivalizan con los obtenidos con los telescopios ópticos, pero nuestro planeta tiene un tamaño limitado, así que ¿por qué no aumentar la línea base combinando señales de radiotelescopios en el espacio? La idea todavía no está madura, toda vez que la interferometría de larga

FIG. 2



Las 27 antenas del sistema de radiotelescopios VLA tienen un área igual al de un plato de 130 metros, pero en condiciones de máxima cercanía su resolución es similar a la de un radiotelescopio de 1,2 kilómetros.

base sigue dando muy buenos resultados en la superficie de la Tierra. Pero, sin duda, en su momento representará el próximo gran salto en la investigación radioastronómica.

Ya se han hecho dos intentos hasta la fecha. El primero, llamado HALCA («muy lejos» en japonés), fue lanzado en febrero de 1997 por la Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA) como parte de un proyecto de interferometría de muy larga base denominado VSOP (*VLBI Space Observatory Programme*). Su órbita permitió establecer líneas base de hasta 30000 kilómetros, superando con ello todas las marcas conseguidas en tierra. Pocos años después, en julio de 2011 Rusia rompió el récord con el lanzamiento del Spektr-R, cuya órbita se extiende más allá de la Luna, lo que elevó la posible línea base hasta los 400000 kilómetros. Esto permitiría realizar observaciones con una resolución mil veces superior a la del telescopio espacial Hubble.

LOS ECOS DEL BIG BANG: MICROONDAS

Entre las longitudes de onda de un milímetro y diez centímetros se extiende el reino de las microondas. En algunas frecuencias es posible efectuar mediciones sobre la superficie terrestre a condición de buscar un lugar muy seco, ya que el vapor de agua es el responsable de la absorción y, por ello, este tipo de observatorios suele ubicarse en lugares como montañas elevadas, globos estratosféricos, el desierto de Atacama e incluso la Antártida (que, aunque no lo parezca, tiene uno de los climas más secos de la Tierra).

La investigación en microondas es importante para los astrofísicos por diversos motivos, pero hay uno que los supera a todos: la radiación cósmica de fondo. Para expresarlo en pocas palabras, es un remanente del Big Bang, la gran explosión inicial que dio origen al universo que vemos ahora. En sus primeras etapas la energía y materia estaban tan concentradas, y sus valores de temperatura eran tan extremos, que la luz no podía viajar libremente. Pasados unos 380000 años la densidad disminuyó lo suficiente para que los fotones pudiesen liberarse de la materia. Conforme el universo crecía en tamaño, la radiación elec-

tromagnética se fue extendiendo y en el proceso perdió energía, pasando a convertirse en microondas, motivo por el que el fondo cósmico también suele recibir el nombre de fondo cósmico de microondas.

Esta especie de eco del Big Bang (aunque la palabra «eco» no es literalmente cierta, ya que no se trata de ondas de sonido) fue descubierto de forma accidental por los investigadores estadounidenses Arno Penzias y Robert Wilson. La energía de la radiación de fondo se corresponde con una temperatura de unos 2,7 kelvins, lo que implica una longitud de onda de un par de milímetros. A pesar de que la atmósfera terrestre absorbe gran parte de la energía de una onda de esa longitud, la señal obtenida fue lo bastante intensa para poder identificarla.

Los datos de tierra indicaron que el fondo cósmico de microondas era isótropo, es decir, que cualquier región del cielo que se observe tiene la misma temperatura. Eso representó un problema, ya que la cosmología vigente requería la existencia de algunas zonas con mayor densidad y temperatura que el resto, zonas que con el tiempo fueron el origen de galaxias y estrellas. Si el fondo cósmico es isótropo, las galaxias no deberían existir.

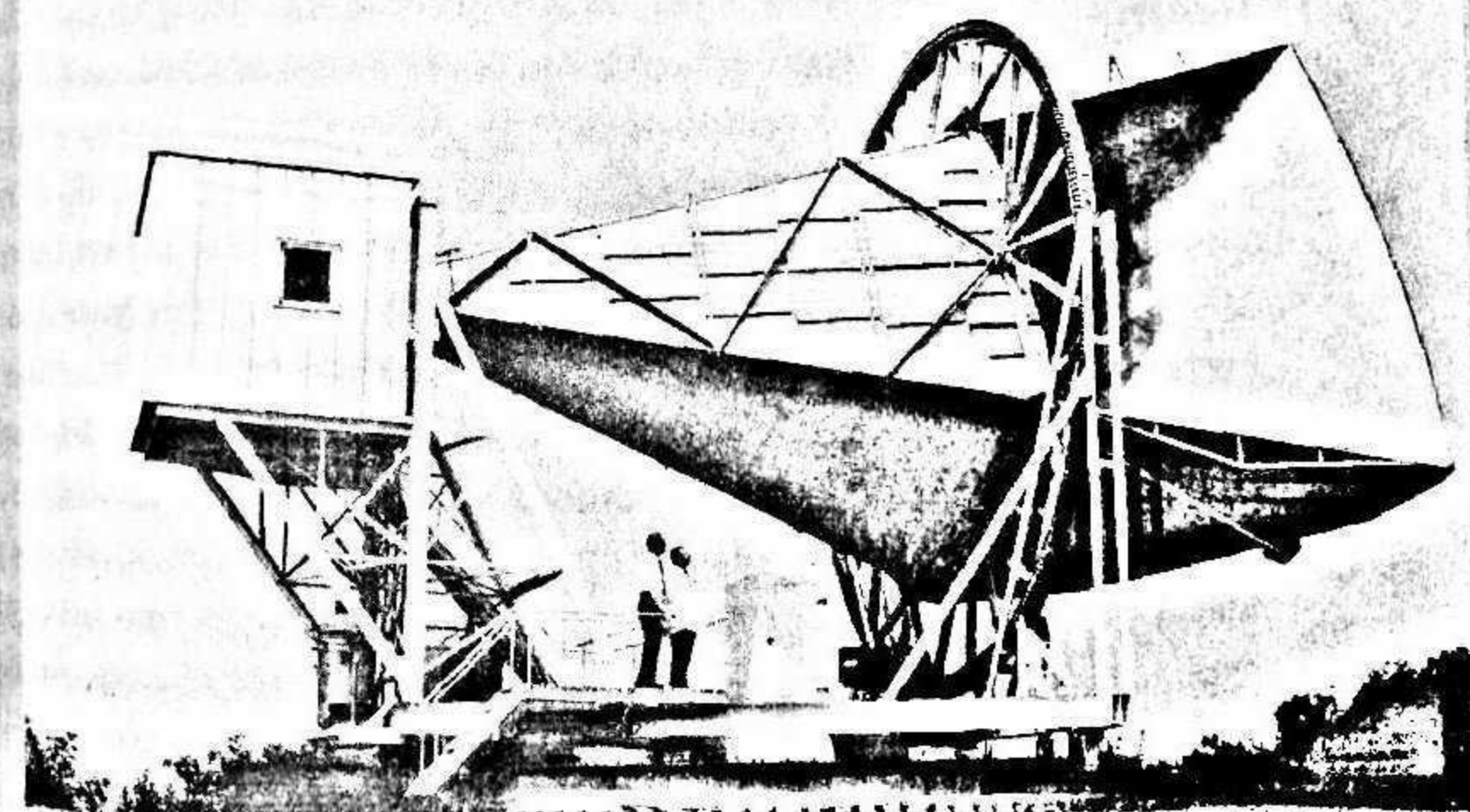
Era preciso efectuar mediciones de alta precisión, y eso no podía conseguirse en tierra o mediante globos de investigación, de modo que en 1989 la NASA puso en órbita el explorador de microondas COBE (*COsmic Background Explorer*) para resolver la cuestión. La radiación de fondo debía medirse con una precisión de varias partes por millón, tarea nada sencilla, pero tras varios años de arduo trabajo se consiguió finalmente confirmar la existencia de un fondo casi constante, correspondiente a una temperatura de 2,725 kelvins. A un nivel de sensibilidad de una parte en cien mil, el cielo mostraba levísimas fluctuaciones de temperatura, lo que significa que el eco del Big Bang es, como se esperaba, anisótropo. Las sutiles concentraciones de energía y materia que formaron las galaxias de nuestro universo por fin habían sido confirmadas, lo que les valió a los astrofísicos estadounidenses John Mather y George Smoot, investigadores principales del proyecto COBE, el premio Nobel de Física de 2006.

EL DESCUBRIMIENTO DEL FONDO CÓSMICO

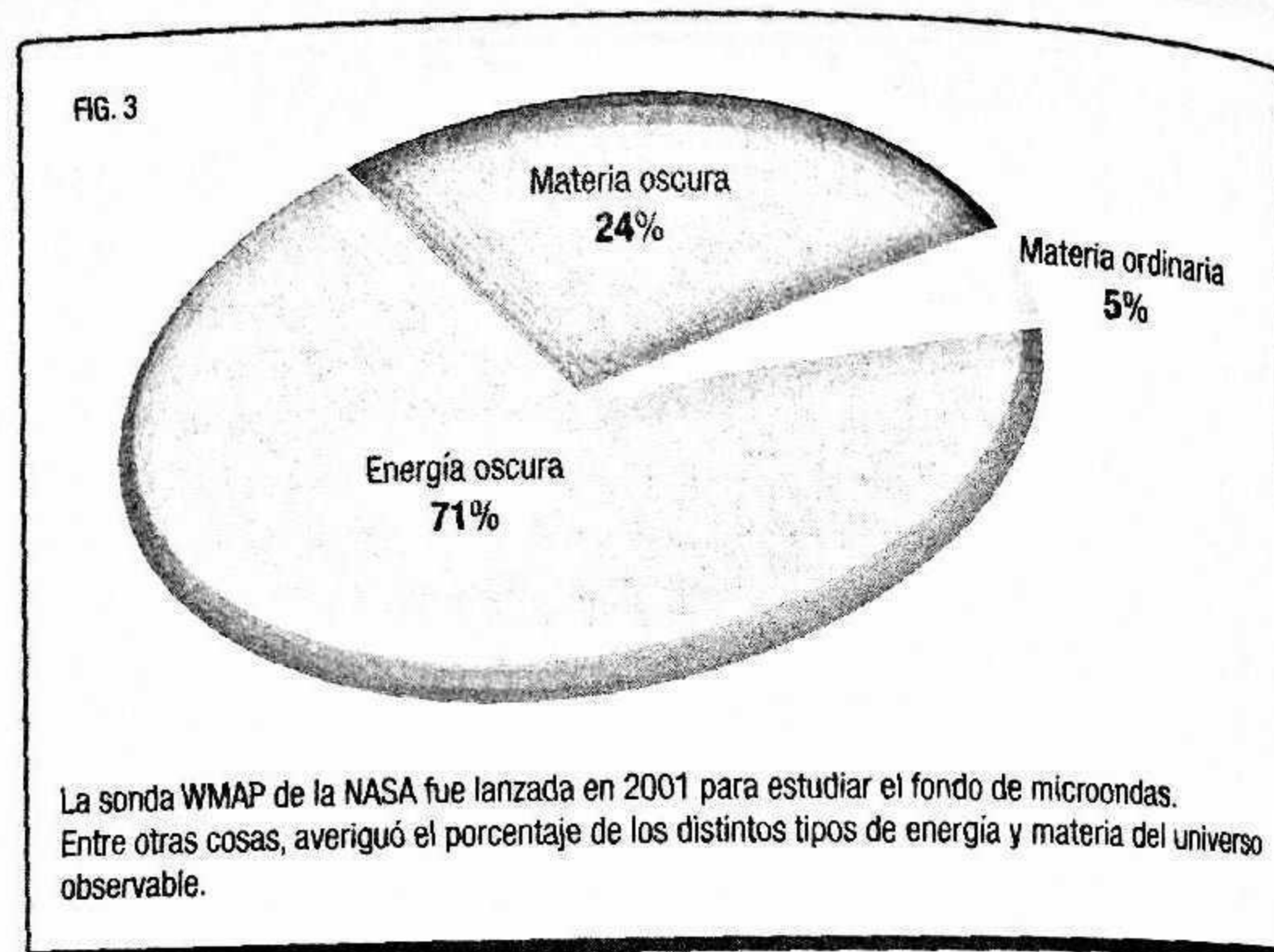
En los años sesenta los laboratorios Bell estudiaban la forma de enviar señales de radio a largas distancias y, cuando esa línea de investigación fue abandonada, los investigadores Arno Penzias y Robert Wilson aprovecharon la oportunidad para analizar las radioseñales procedentes de galaxias lejanas. Se encontraron con un problema, una especie de siseo o ruido de fondo en la banda de microondas que impedía una recepción clara. Después de descartar multitud de hipótesis, incluida la posibilidad de que la señal proviniese de los excrementos de palomas (lo que se denominó «material dieléctrico»), concluyeron que la señal tenía que venir de fuera del sistema solar, quizá incluso de fuera de nuestra galaxia.

Una antena para captar el eco del Big Bang

El emplazamiento de observación (en la imagen) se encontraba cerca de la Universidad de Princeton, en Nueva Jersey, Estados Unidos y, precisamente allí, los científicos Bob Dicke y Jim Peebles estaban considerando la hipótesis de que una Gran Explosión pudiese haber dejado su impronta en la forma de radiación de microondas. Sin proponérselo, Penzias y Wilson habían encontrado la señal predicha por Dicke y Peebles. En 1978 recibieron el Nobel de Física «por su descubrimiento de la radiación cósmica de fondo de microondas», por accidental que hubiera sido.

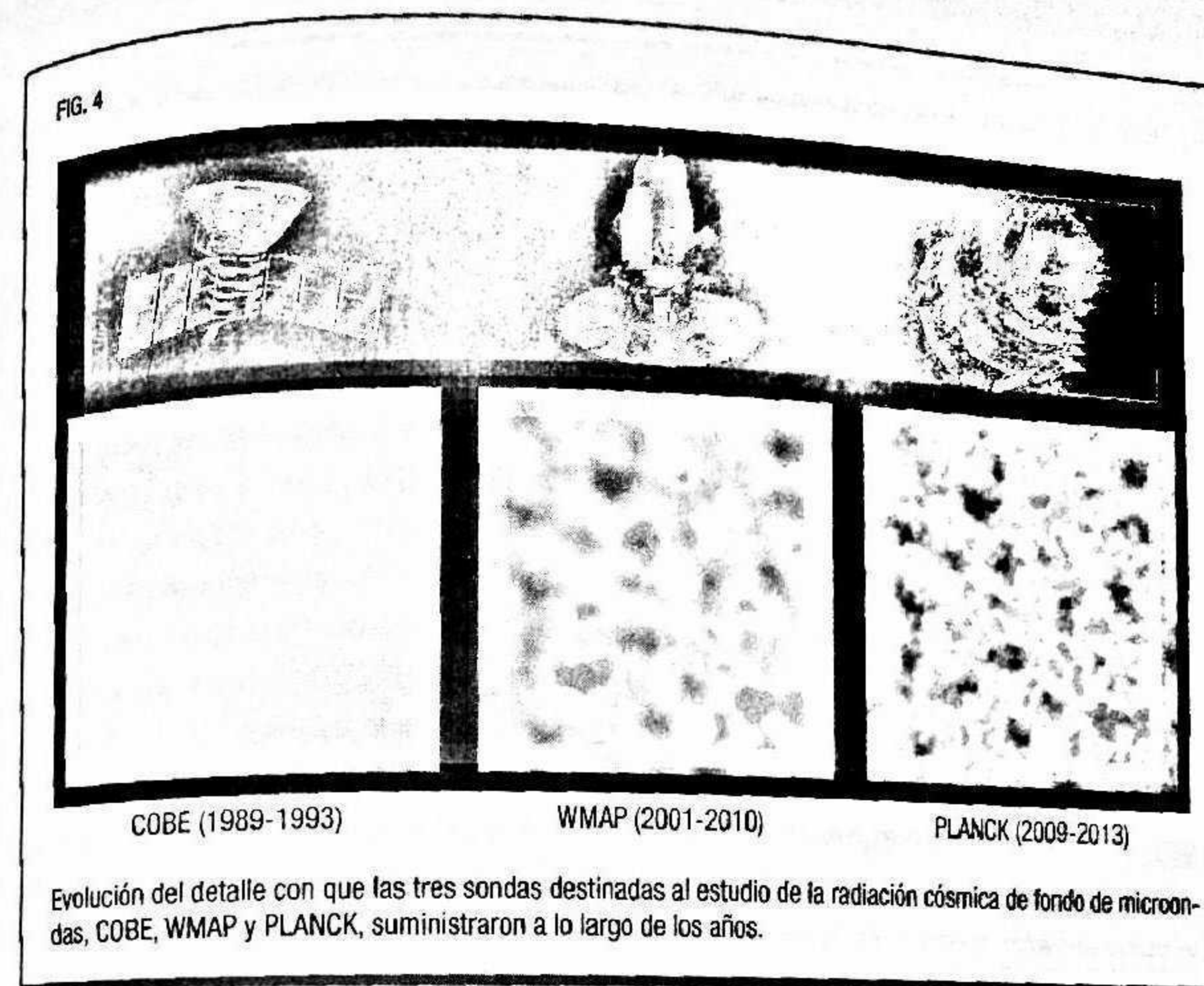


La antena desde donde Penzias y Wilson detectaron el remanente del Big Bang se hallaba en los Laboratorios Bell de Nueva Jersey, Estados Unidos.



A pesar de que la anisotropía del fondo cósmico de microondas había sido verificada, la victoria fue por la mínima, ya que las fluctuaciones se encontraban cerca del límite de sensibilidad de COBE y la resolución espacial no era muy alta. El siguiente paso lógico pasaba por mejorar las medidas ya efectuadas, y ese fue el objetivo de la siguiente misión espacial, llamada WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*). No solo confirmó las fluctuaciones de la radiación cósmica de fondo y las midió con detalle nunca visto hasta entonces, sino que sus observaciones fueron clave para afianzar el modelo cosmológico Λ -CDM, que explica la forma y estructura del cosmos, y también confirmaron el fenómeno conocido como inflación, según el cual el universo sufrió una enorme expansión en sus etapas iniciales. También sorprendió con el descubrimiento de que la materia conocida constituye menos del 5% de la masa del universo observable (figura 3). Un 24% es materia oscura, y el 71% restante es energía oscura; ambas se denominan «oscura» porque, sinceramente, nadie sabe su composición.

Los datos proporcionados por WMAP fueron a su vez mejorados y ampliados por la sonda Planck de la ESA (en la figura 4 los detalles de la radiación aportados por las tres sondas), que



operó en el punto de Lagrange L2 entre 2009 y 2013. Entre ambas consiguieron reducir el contenido de energía oscura del universo al 68%, lo que tuvo implicaciones a la hora de refinar los modelos cosmológicos, si bien seguimos sin saber qué es la energía oscura y de qué se compone. Quizá esa y otras preguntas puedan ser respondidas gracias a la sonda Euclid de la ESA. Lo sabremos cuando sea lanzada en 2020, y raro será (a la vista de los resultados de sus predecesoras) que no formule nuevas preguntas sobre el origen y el fin del universo.

RADIACIÓN DE DIMENSIONES MICROMÉTRICAS: LOS INFRARROJOS

Si continuamos bajando la longitud de onda, el espectro electromagnético pasa de las microondas a los infrarrojos. No existe

una separación tajante pero podemos describirlas como ondas con longitud entre una y mil micras (una micra es una milésima de milímetro). Su comportamiento tiende a asemejarse cada vez más a la luz visible y, al igual que en el caso de las microondas, algunas frecuencias están vetadas a la observación con base en tierra. Una vez más hay que elevarse alto para captarlas.

En busca de un lugar seco, la NASA decidió a mediados de los años setenta poner un observatorio de infrarrojos en el aire mediante el sencillo procedimiento de instalarlo en un avión. A tal fin modificaron un avión de carga militar C-141 y lo equiparon con un telescopio sensible a los infrarrojos, naciendo así el Observatorio Aerotransportado Kuiper. Su tiempo de vuelo es muy inferior al de un satélite, pero lo compensa con un menor coste y mayor sencillez de mantenimiento.

Durante los veinte años que estuvo en funcionamiento, Kuiper permitió realizar grandes descubrimientos científicos como la observación de anillos en Urano y de la atmósfera de Plutón. Fue retirado en 1995 y, a la vista de su valía como plataforma de observación, la NASA le buscó un sustituto: SOFIA (*Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*), en esta ocasión basado en un Boeing 747 modificado. Se espera que vuele hasta al menos el año 2035 y que continúe la estela de éxitos de su antecesor.

Pero los observatorios aerotransportados no son la solución ideal. Aunque resultan más baratos y flexibles, su tiempo de vuelo es limitado, y para ciertas longitudes de onda (sobre todo en la zona de microondas) ni siquiera una gran altitud permite observaciones viables. Por ello fue preciso saltar al espacio.

El primer gran observatorio orbital en infrarrojos fue el IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*). Construido conjuntamente por Estados Unidos, los Países Bajos y el Reino Unido, se puso en órbita terrestre en enero de 1983. Durante sus diez meses de vida útil consiguió cartografiar casi todo el cielo (un 96% para ser más precisos) en cuatro longitudes de onda de infrarrojos y detectar unas 350 000 fuentes emisoras, incluyendo galaxias de gran luminosidad en infrarrojo, media docena de cometas y diversos discos de polvo alrededor de varias estrellas, los cua-

les podrían formar sistemas planetarios en el futuro. La carrera científica del IRAS fue muy fructífera, pero por desgracia breve, ya que después de diez meses de operaciones su reserva de helio líquido (necesario para enfriar el telescopio) se agotó.

El éxito del IRAS propició la construcción de un segundo satélite de infrarrojos. Lanzado en 1995, el ISO (*Infrared Space Observatory*) fue una iniciativa de la ESA con participación de la NASA y la JAXA. Su sensibilidad era mil veces superior a la del IRAS y permitió resolver objetos cien veces más pequeños en un mayor rango de longitudes de onda. Gracias al ISO los astrofísicos descubrieron que el agua también está presente en el espacio, concretamente en forma de vapor alrededor de algunas estrellas. También permitió el sondeo de nubes de polvo interestelares, que resultan invisibles a los telescopios ópticos.

El ISO sufrió el mismo destino que su predecesor (muerte por falta de refrigerante), pero su vida útil casi triplicó a la del IRAS, y resultó un tiempo bien empleado hasta el último minuto. Justo antes de apagar sus instrumentos, el satélite ISO realizó su último gran descubrimiento: líneas de emisión de hidrógeno en la estrella supergigante Eta Canis Majoris. Seis días después, el 16 de mayo de 1998, recibió la orden de desconexión final.

Tal era el entusiasmo que los descubrimientos del IRAS y del ISO habían provocado entre la comunidad científica, que en menos de un año la NASA ya tenía en órbita un nuevo satélite de observación infrarroja. El WIRE (*Wide-field Infrared Explorer*) no podría explorar tantas bandas de frecuencia y solamente observaría algunas pequeñas regiones del cielo, pero eso tenía un motivo. Al contrario que sus dos predecesores, que habían sido contruidos para explorar el cielo en general, el WIRE fue diseñado con dos objetivos muy concretos. Por un lado se deseaba estudiar las protogalaxias, agrupaciones de gas y polvo que dieron lugar a las galaxias actuales; por otro, las llamadas galaxias con brote estelar, que se caracterizan por tener una tasa de nacimiento de estrellas muy superior a lo habitual y los astrofísicos querían examinarlas con mayor detenimiento.

Las grandes expectativas puestas en el satélite WIRE y sus observaciones nunca se cumplieron. Un fallo mecánico hizo entrar

el satélite en un régimen de giro no deseado, y aunque los controladores de vuelo consiguieron normalizar la situación el daño ya estaba hecho. La misión inicial de cuatro meses terminó antes siquiera de comenzar. El WIRE siguió girando en órbita terrestre sin proporcionar información útil, hasta que en mayo de 2011 se desintegró en la atmósfera terrestre.

La pérdida del WIRE fue decepcionante pero pronto llegó la revancha. El Programa Grandes Observatorios de la NASA incluyó un gran observatorio de infrarrojos llamado Spitzer, que fue lanzado en agosto de 2003 con un extenso catálogo de objetivos para estudiar: estrellas marrones, planetas extrasolares, galaxias de gran luminosidad en infrarrojo, núcleos de galaxias activos y nubes moleculares. Spitzer estuvo a la altura de la misión. Su vida útil, inicialmente programada en dos años y medio, se extendió hasta más del doble y, aunque el suministro de helio líquido se agotó hace años, dos de sus instrumentos detectores todavía funcionan. La Misión Extendida Spitzer, que comenzó en mayo de 2009, sigue activa a día de hoy, todo un récord en la exploración espacial en infrarrojo que ayudó a los astrofísicos a quitarse el mal sabor de boca del WIRE.

Spitzer fue seguido por el WISE (*Wide-field Infrared Survey Explorer*), un observatorio lanzado a finales de 2009. En apenas un año ya había cartografiado toda la bóveda celeste dos veces (hasta diez en algunas regiones próximas al ecuador celeste) y fotografiado casi mil millones de objetos, desde asteroides hasta galaxias. Solo en nuestro sistema solar descubrió centenares de miles de nuevos cometas y asteroides.

Tras ello fue puesto en hibernación, pero en 2013 fue despertado de nuevo para una ampliación de su misión. Los nuevos descubrimientos que realizó desde entonces pueden calificarse de extraordinarios, como por ejemplo varios millones de candidatos potenciales a agujero negro o una galaxia mil veces más luminosa que la Vía Láctea.

Con todo, el motivo principal para su reactivación fue la detección de objetivos que estaban mucho más cerca de nosotros. Se trataba de los llamados Objetos Cercanos a la Tierra (NEO, *Near-Earth Objects*), cuerpos como cometas y asteroides cuya

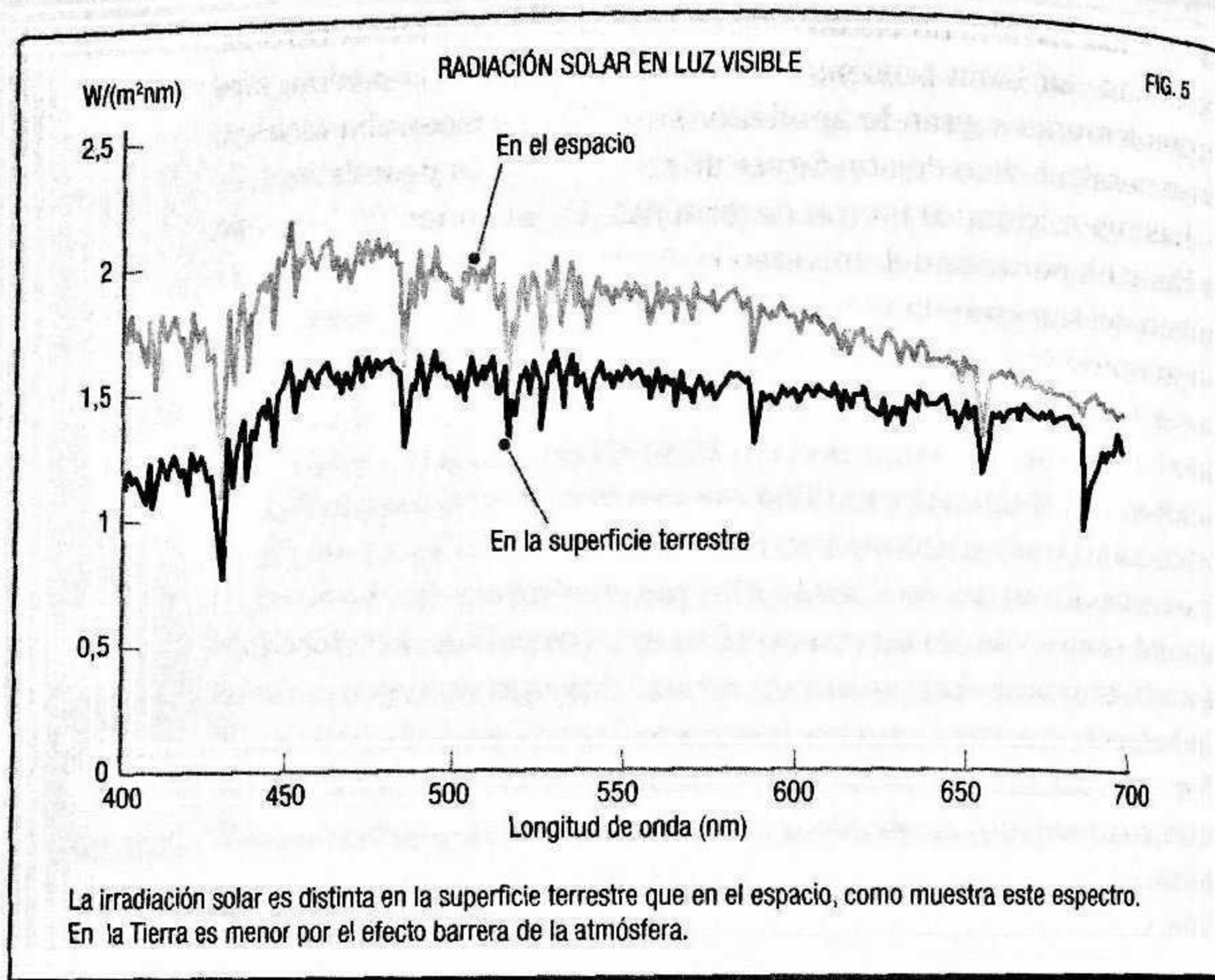
trayectoria los acerca a la Tierra más de lo conveniente para nuestra tranquilidad. Su pequeño tamaño los hace invisibles para todos los telescopios ópticos salvo los más grandes y sensibles, pero resultan fácilmente detectables en la banda de infrarrojos. La nueva misión, denominada NEOWISE, sigue activa hasta la fecha y ha permitido detectar más de 260 NEO hasta la fecha. El más cercano, conocido con el código 2010 MU112 y descubierto en junio de 2010, se acercó hasta tan solo tres mil kilómetros de la órbita terrestre. Demasiado cerca para no tener ojos vigilantes en el espacio.

Mientras el Spitzer y el WISE proporcionaban datos a la NASA, otros países construían y lanzaban sus propios telescopios de infrarrojos. En mayo de 2009 la ESA puso en órbita el observatorio Herschel que, con su espejo de 3,5 metros, era el mayor telescopio de infrarrojos jamás puesto en órbita. Sus más de dos toneladas de helio lo mantuvieron en funcionamiento hasta abril de 2013. Por su parte, la agencia espacial japonesa puso en órbita la Akagi, que estuvo operando desde febrero de 2006 hasta agosto de 2007, momento en el que se agotó el helio utilizado para la refrigeración. La dificultad para mantener un entorno lo bastante frío sigue siendo el talón de Aquiles para la astronomía en infrarrojos, y no parece que el problema tenga solución sencilla a la vista.

EL ESPECTRO VISIBLE

Llegamos por fin a la banda de frecuencias con la que los humanos estamos más habituados: la luz visible. Físicamente, las ondas electromagnéticas que lo constituyen son muy similares a las ondas de infrarrojos, y tienen una longitud de entre 400 y 700 nanómetros (un nanómetro, o nanometro, es una millonésima de milímetro). Los límites no son precisos y, de hecho, algunos telescopios de luz visible son asimismo sensibles en las bandas inmediatas del infrarrojo o el ultravioleta cercanos.

La atmósfera terrestre resulta casi totalmente transparente a la luz visible, y eso nos viene muy bien a la mayoría de los seres vivos debido a que nuestro Sol emite la mayoría de su energía en ese



rango de longitudes de onda (figura 5). No es casualidad, por tanto, que a lo largo de nuestra historia evolutiva hayamos desarrollado instrumentos captadores de luz para procesar información de nuestro entorno y que nuestros sentidos reciban la mayor cantidad de datos gracias a la visión. Si la luz visible fuese bloqueada por el aire, o si nuestra estrella emitiese sobre todo en microondas, nuestros ojos serían muy diferentes. Podemos conjeturar cómo sería la vida en el interior de la atmósfera de Júpiter, donde capas nubosas de miles de kilómetros de espesor bloquean la luz solar. Tal vez allí los seres vivos pudieran desarrollar detectores de ondas de radio.

La observación del cielo desde la Tierra tal vez sea tan antigua como el propio ser humano. Durante miles de años los ojos fueron nuestro único medio de observación, hasta que en 1609 Galileo Galilei tuvo la ocurrencia de apuntar al cielo su telescopio, un instrumento de prestaciones similares a las de unos prismáticos

modernos. De repente, la bóveda celeste dejó de ser territorio desconocido. La Luna presentaba irregularidades, Júpiter tenía sus propios mundos girando alrededor suyo, Venus mostraba fases y, en general, el cielo dejaba de ser un reino perfecto y modélico.

Las repercusiones fueron de gran calado. El conocimiento que la humanidad tenía del universo no dejó de aumentar, y el incremento del tamaño y la precisión de los

telescopios fue un elemento clave en la carrera de los científicos por saber más acerca del cielo. Un telescopio funciona en esencia como una superficie colectora de fotones y, al igual que un cubo que recoge agua de lluvia, resulta tanto más eficaz cuanto mayor sea su anchura. Los telescopios actuales, con diámetros que superan los diez metros, son capaces de detectar

estrellas cien millones de veces más débiles que las que el ser humano puede captar a ojo desnudo. Con todo, la observación desde tierra está limitada por varios factores que dificultan la visión. Las nubes constituyen uno de los primeros, pero también existe toda una panoplia de partículas en suspensión atmosférica. Algunas son de origen humano, como el humo de la combustión; otras tienen procedencia natural, como el polvo del desierto, las cenizas volcánicas, o los cristales de sal marina. El aire puede desviar la trayectoria de un haz de luz si este pasa por zonas con distinta densidad, temperatura o composición, o si existen regiones de movimiento turbulento; es lo que hace que una estrella centellee ante nuestros ojos en lugar de ofrecer una imagen de intensidad fija.

Los astrofísicos han aprendido a lidiar con los problemas que presenta nuestra atmósfera. Por ello los grandes observatorios están situados lejos de zonas pobladas o iluminadas, en la cumbre de grandes montañas donde el espesor de la atmósfera es menor y el aire se mueve en flujo laminar (es decir, sin provocar turbulencias). Las cámaras fotográficas permiten examinar una región del cielo durante varias noches, aumentando así el

La naturaleza nos ha proporcionado un universo en el que la energía radiante de casi cualquier longitud de onda viaja grandes distancias en línea recta con una absorción casi despreciable.

LYMAN SPITZER

número de fotones captados. Los adelantos más modernos, desarrollados inicialmente en el ámbito militar, permiten sondear activamente la atmósfera mediante haces de luz láser, y la tecnología de óptica adaptativa deforma los espejos captadores de luz para proporcionar una imagen lo más nítida posible.

La solución a todos estos problemas sería mucho más sencilla si nuestro telescopio estuviese situado en el espacio. Allí no hay aire, partículas en suspensión o nubes que interfieran en la observación y, como no hay atmósfera, tampoco tenemos dispersión de luz solar, lo que significa que puede observarse incluso de día. Las únicas limitaciones a la observación serían las impuestas por la naturaleza ondulatoria de la luz.

Las técnicas modernas de corrección de imágenes no existían y, de hecho, ni siquiera se había lanzado un solo satélite al espacio, cuando el astrofísico estadounidense Lyman Spitzer (1914-1997), el mismo que dio nombre al telescopio de infrarrojos, propuso el desarrollo de un telescopio espacial. Durante dos décadas Spitzer hizo campaña a favor de su idea, hasta que en 1977 la NASA decidió hacer realidad su sueño. La empresa PerkinElmer, constructora del espejo de 2,4 metros de diámetro, tardó dos años en pulirlo hasta darle la forma adecuada.

Cuando finalmente el telescopio estaba listo para ser puesto en órbita, el transbordador espacial Challenger estalló durante un despegue con sus siete tripulantes a bordo y todo el programa de lanzaderas de la NASA se interrumpió durante varios años. Esto fue un grave problema, ya que no solamente se contaba con el transbordador espacial para el despegue sino también para el reaprovisionamiento y reparación en órbita del telescopio.

Finalmente, el 24 de junio de 1990, el telescopio espacial fue puesto en órbita por el transbordador Discovery. La emoción inicial de los astrónomos no tardó en convertirse en decepción al comprobar que las primeras imágenes no eran tan nítidas como se esperaba. Un error de fabricación en el espejo hizo que este mostrase una desviación respecto a su superficie ideal. La diferencia era minúscula, inferior al grosor de un cabello humano, pero era suficiente para degradar sus imágenes hasta el punto de inutilizar observaciones precisas de objetos de luminosidad muy débil.

Como traer de vuelta el telescopio para volver a pulir el espejo era una opción excesivamente cara y difícil, la solución pasó por analizar las imágenes ya obtenidas, determinar la corrección adecuada y construir un aparato corrector, una especie de lentes de contacto que compensasen los errores del espejo principal. El instrumento, llamado COSTAR (*Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement*), fue instalado en el telescopio en diciembre de 1993, no sin sacrificios puesto que hubo que retirar uno de los instrumentos de medida.

El sueño de Lyman Spitzer por fin se había hecho realidad, pero el gran telescopio no llevaría su nombre, ya que es costumbre de la NASA no bautizar sus sondas con nombres de personas vivas. Spitzer murió en 1997, y pocos años después un nuevo observatorio orbital de infrarrojos llevó su nombre (lo lleva todavía, ya que el telescopio Spitzer sigue en funcionamiento). La NASA escogió el nombre de un astrónomo que proporcionó pruebas observacionales de la expansión del universo y que dio su nombre a una relación que liga la velocidad de alejamiento de una galaxia con su distancia a la Tierra. El gran telescopio orbital es conocido en todo el mundo con el nombre de Telescopio Espacial Hubble (en la imagen superior izquierda de la pág. 103).

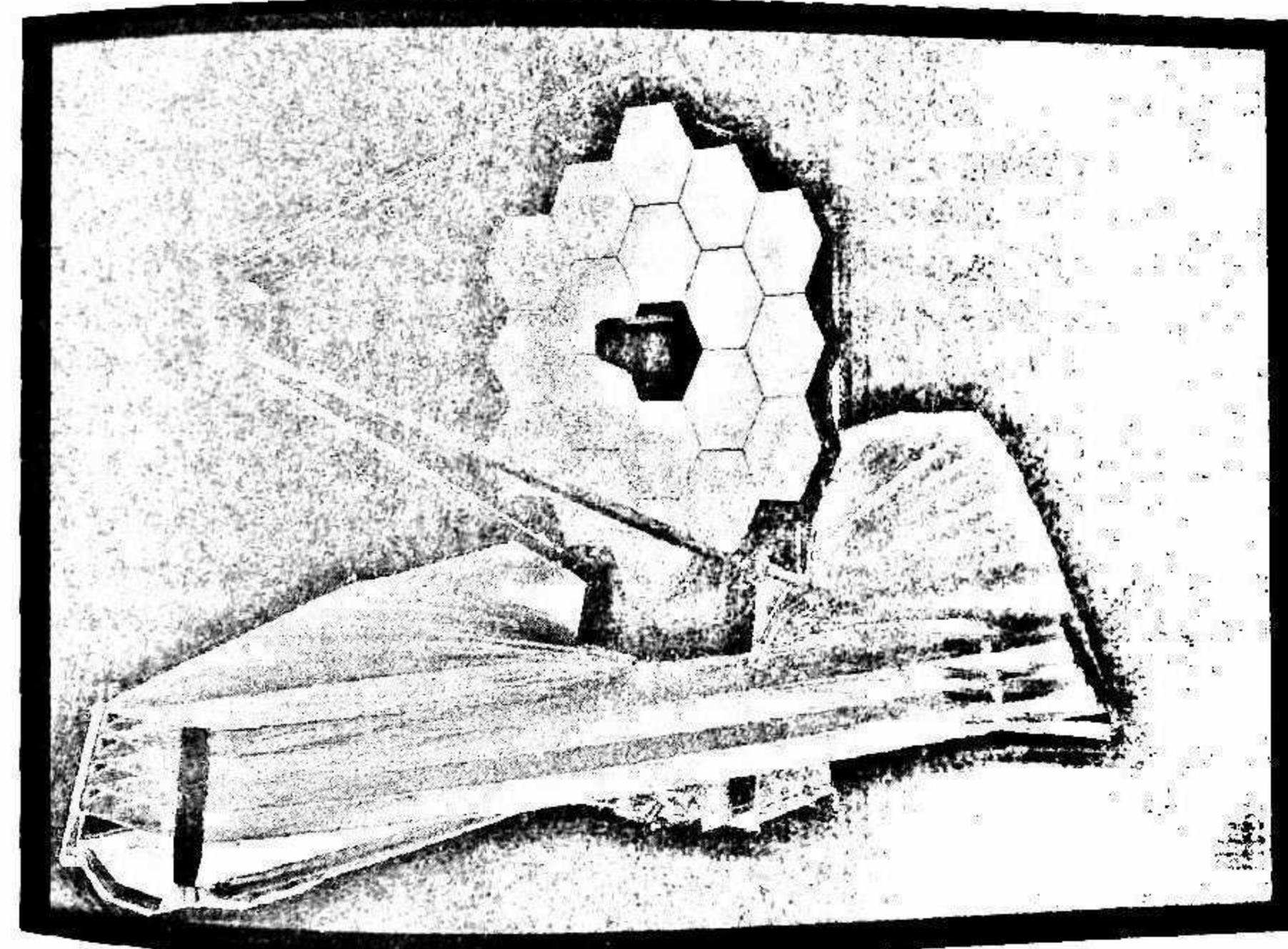
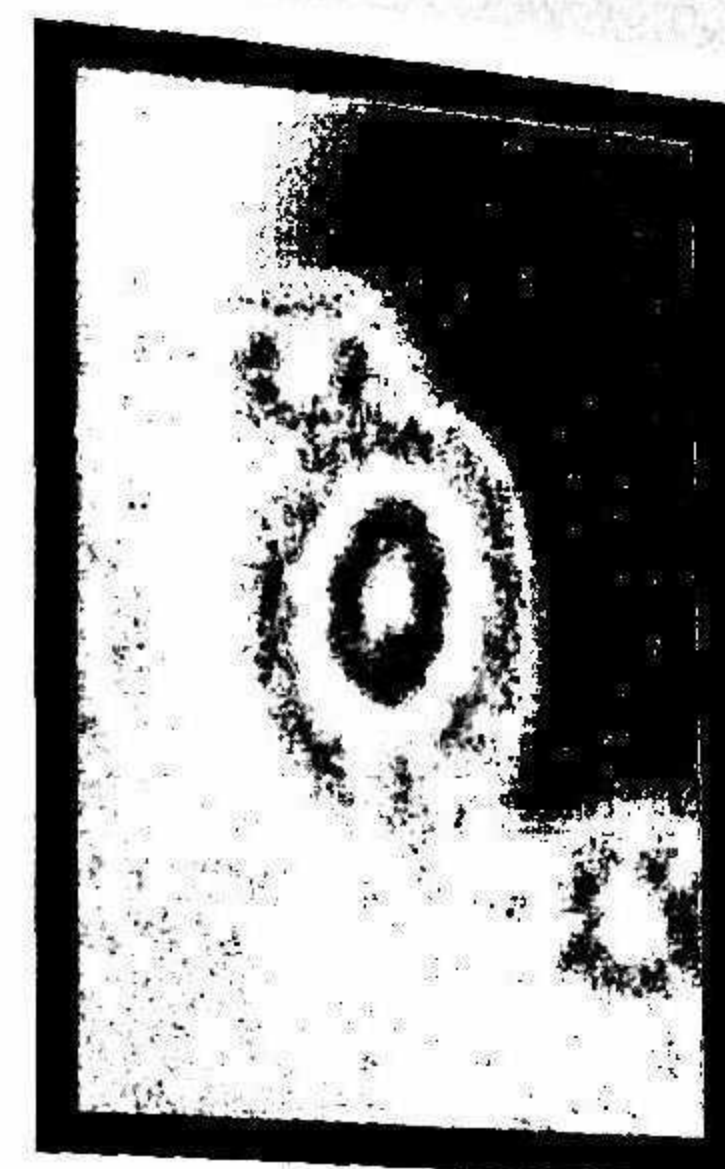
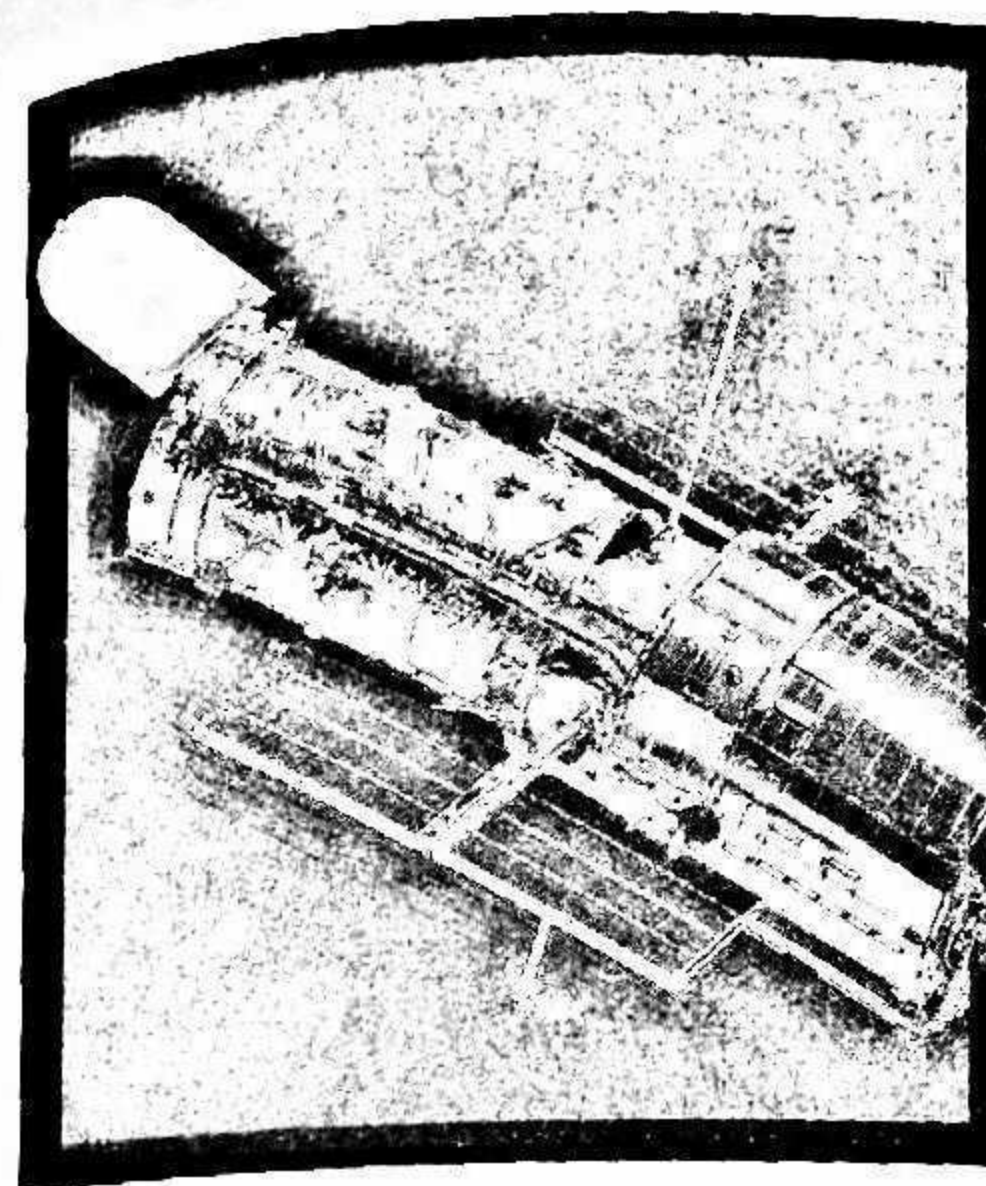
El telescopio Hubble no solo ha resultado una excelente herramienta de observación astrofísica por su longevidad. Además de la «operación de cataratas» de 1993, otras tres misiones del transbordador (en 1997, 1999 y 2002) alejaron al telescopio de la obsolescencia, proporcionándole nuevos detectores, un ordenador mejorado y giróscopos para sustituir los que ya habían fallado. La pérdida del transbordador Columbia en 2003 forzó a la NASA a cambiar sus normas de vuelo, obligando a que cualquier misión futura pudiese atracar en la Estación Espacial Internacional en caso de emergencia. Eso hubiera significado el fin de las visitas al Hubble, puesto que su órbita impedía una visita conjunta Hubble-EEI, pero la importancia del telescopio para la comunidad científica era tal que la NASA hizo una excepción, y en octubre de 2008 autorizó que la lanzadera Atlantis realizara la última misión de reparación y actualización. Con la retirada definitiva de la flota de transbordadores en 2011, el Hubble ya

no dispone de más revisiones técnicas. Cuando falle, será para siempre.

El telescopio espacial (en la imagen superior derecha de la página siguiente, una de las muchas fotografías captadas por él) mantiene una salud envidiable tras treinta años de misión y, aunque sus días están contados, nadie sabe realmente cuánto tiempo seguirá en funcionamiento. En la órbita a que se encuentra, a más de quinientos kilómetros de altitud, existe aún un tenue remanente de la atmósfera terrestre y, poco a poco, el rozamiento con las capas superiores lo irá frenando. Dado el excelente estado en el que se encuentra, la NASA ha extendido las operaciones del Hubble hasta junio de 2021. Dependiendo de la actividad solar y su impacto en las capas superiores de la atmósfera, el Hubble podría permanecer en órbita hasta mediados de la década de 2030, salvo que la NASA, quizá a través de alguna empresa privada, consiga enviarle una misión no tripulada para lanzarlo a una órbita superior.

Sea cual sea el futuro del Hubble, su sucesor ya está preparándose para tomar el relevo. Se trata del telescopio espacial James Webb (JWST), bautizado por el administrador que dirigió la NASA entre 1961 y 1968, que fueron los años de la carrera espacial a la Luna. Como contraste con el Hubble y su imagen de telescopio tradicional (un largo tubo con los instrumentos en su interior), el JWST parece más bien un portaaviones con un gigantesco cañón de defensa espacial. Su espejo, con una superficie siete veces superior a la del Hubble, consta de 18 bloques hexagonales y podrá observar tanto en infrarrojos como en buena parte del espectro visible. Todo el conjunto está abierto al espacio y protegido de la luz solar por una pantalla protectora compuesta de un nuevo material que la NASA, con cierto toque de humor, bautizó con el nombre de inobtanio. La combinación de la pantalla y un sistema de radiadores permitiría mantener el telescopio frío y evitar la «muerte por calor» que acaece a los telescopios de infrarrojos cuando se agotan sus reservas de refrigerante.

El JWST (recreado en la ilustración inferior de la página siguiente) ha sido criticado debido a su complejidad técnica, sus



Arriba a la izquierda, el Telescopio Espacial Hubble y a su derecha, los restos de la supernova SN 1987A, una de las muchas fotografías realizadas por este telescopio. Abajo, el sustituto del Hubble, el telescopio espacial James Webb.

retrasos y su creciente presupuesto. En cierto modo es algo inevitable y consustancial a toda misión espacial innovadora: cuando aparecen problemas y fallos siempre hay que empujar las fronteras técnicas y de ingeniería hasta el límite. A pesar de ello, el compromiso de las agencias espaciales con el JWST es firme.

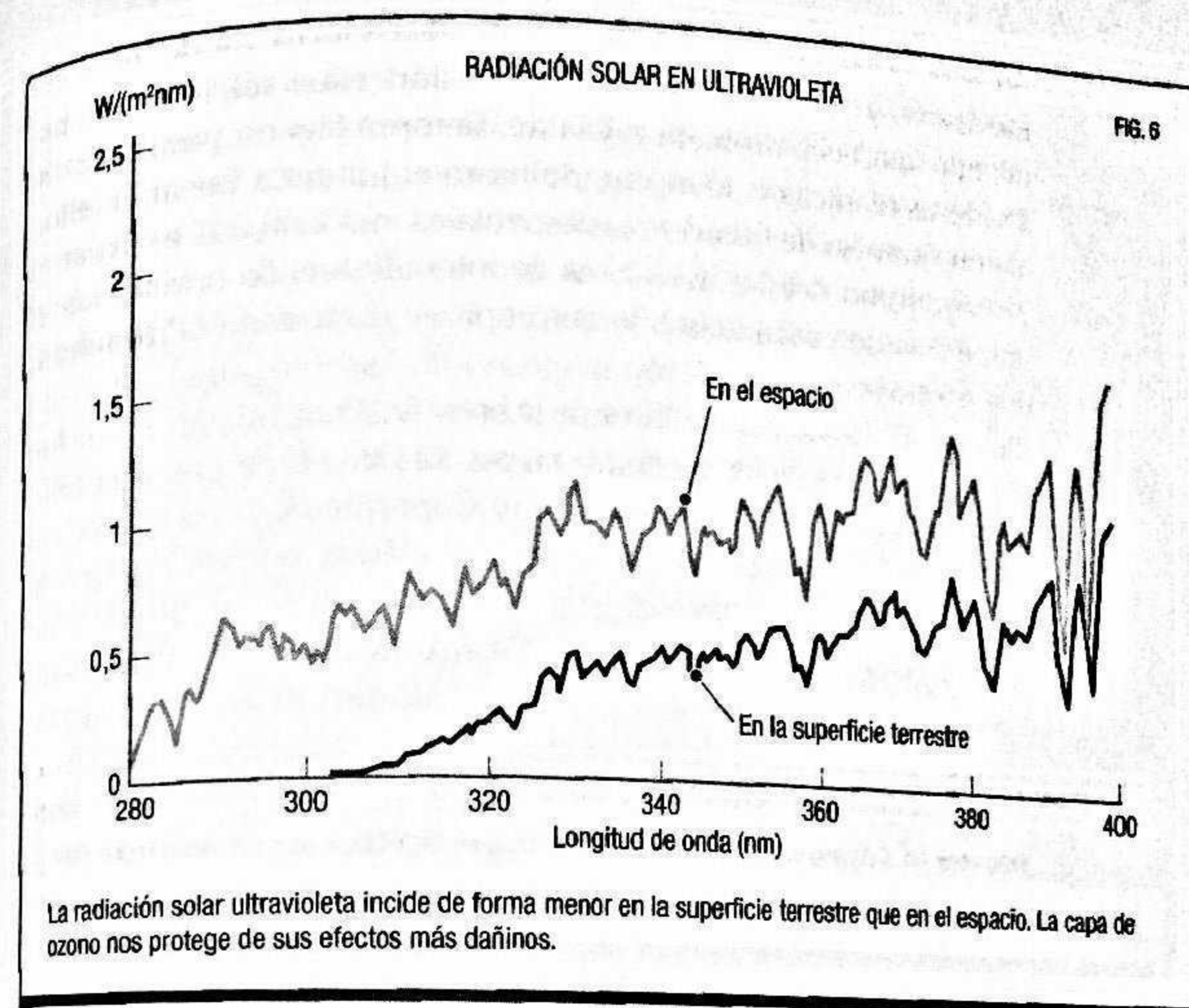
Un último detalle: todos los problemas técnicos, retrasos y aumentos de presupuesto ya han aparecido antes... durante el desarrollo y construcción del telescopio Hubble, cuya valía nadie cuestiona ahora. Salvo imprevistos de gran magnitud, el telescopio James Webb cumplirá su misión asignada con un éxito comparable al de su antecesor.

ONDAS MÁS PEQUEÑAS TODAVÍA: LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

Conforme la energía de las ondas electromagnéticas aumenta, pasamos del espectro de luz visible a la banda que llamamos ultravioleta, constituida por ondas con una longitud de entre 10 y 400 nanómetros, aproximadamente el tamaño de la mayoría de los virus.

Los fotones de los rayos ultravioleta tienen la propiedad de ser lo bastante energéticos como para dañar moléculas como las del ADN, provocando mutaciones. Es por ese motivo que los bronceadores solares incorporan elementos que bloquean o reflejan la radiación en el llamado espectro UVA, que engloba los ultravioletas de mayor longitud de onda (entre 320 y 400 nanómetros). Los llamados UVB (200-320 nanómetros) y los ultravioleta de más alta frecuencia son absorbidos por la capa de ozono que existe en nuestra atmósfera (figura 6).

Es bueno que los humanos (por no hablar del resto de la biodiversidad) nos encontremos protegidos de la mayoría de los rayos ultravioleta que provienen del Sol, pero por supuesto eso representa una mala noticia para los astrofísicos. En el rango ultravioleta podemos disponer de información similar a la del visible, solo que con fotones de menor longitud de onda y, por tanto, de mayor energía. Entre las fuentes de rayos ultravioleta se cuentan objetos muy calientes, como estrellas jóvenes masivas,



enanas blancas, restos de supernovas y cúmulos de galaxias, así como la corona solar de nuestra estrella.

De nuevo tenemos una banda de observación bloqueada por la atmósfera. Afortunadamente, las condiciones para un satélite de ultravioleta son bastante sencillas, ya que la óptica del ultravioleta es muy similar a la del visible, no se precisan grandes estructuras ni tampoco refrigeración como los satélites infrarrojos. Todo ello hizo que, al dar el salto al espacio, la astronomía en ultravioleta fuese pionera.

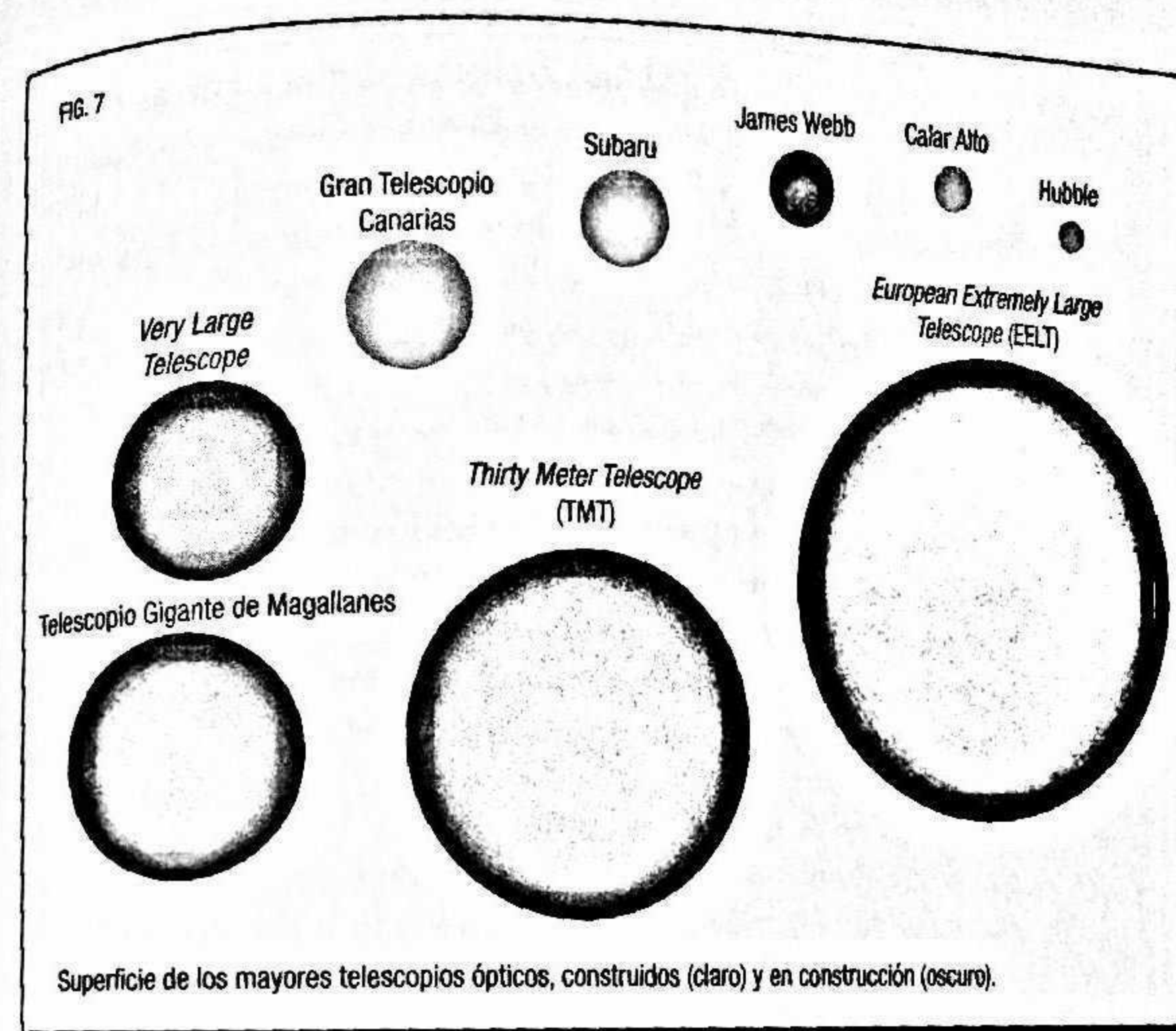
Los primeros observatorios en ultravioleta fueron los de la serie OAO (*Orbiting Astronomical Observatory*), gestionados por la NASA. El primero de ellos, OAO-1, fue lanzado en agosto de 1966 pero sufrió un fallo eléctrico poco después de entrar en órbita y nunca entró en servicio. Dos años después despegó el OAO-2 y, durante cuatro años, sus once telescopios examinaron

todo tipo de cuerpos visibles en el ultravioleta: el cinturón de radiación de la Tierra, la Luna, cometas, varios planetas del sistema solar, nebulosas, estrellas de diversas clases, partículas de polvo en el espacio, cúmulos globulares... la lista fue muy larga. Además de los resultados meramente científicos, los ingenieros consiguieron validar la eficacia de los sistemas de orientación y estabilización del satélite, lo que sería de gran utilidad para futuras misiones en el espacio.

Los siguientes dos satélites de la serie OAO arrojaron, como los anteriores, una de cal y otra de arena. El OAO-3, lanzado en 1972 y posteriormente rebautizado como Copernicus, contaba con un telescopio y un espectrómetro desarrollados por un equipo de la Universidad de Princeton dirigido por el ya nombrado Lyman Spitzer, y permitió el estudio de las características espectrales de planetas, estrellas y galaxias durante casi diez años. El siguiente, el OAO-B, falló antes de poder realizar una sola observación.

En conjunto, la serie OAO mostró las ventajas de elevar telescopios al espacio, y su éxito animó a Spitzer a perseverar en la construcción del futuro telescopio óptico Hubble, hoy desfasado en comparación con los actuales y futuros telescopios ópticos (figura 7). Asimismo, al abrir la ventana del ultravioleta, mostró el camino a seguir para futuras misiones, las cuales no tardaron en llegar. El programa estadounidense tripulado Apolo, de exploración lunar, incluyó una cámara ultravioleta que fue utilizada por los astronautas del Apolo 16 en 1972, los soviéticos usaron cámaras ultravioleta Orion en diversos observatorios tripulados orbitales de los años setenta y la agencia espacial ESRO (antecesora de la actual ESA) colaboró con la NASA en el TD-1A.

El siguiente paso fue la construcción y puesta en órbita del IUE (*International Ultraviolet Explorer*), una iniciativa de la ESA con colaboración de la NASA para observar luz ultravioleta con una longitud de onda de entre 115 y 320 nanómetros. Una de las novedades del nuevo satélite consistió en su modo de funcionamiento. Hasta entonces los astrofísicos solicitaban una observación, la enviaban a la agencia que operase el satélite y esperaban los resultados. Los usuarios del IUE, por el contrario, podían actuar en tiempo real, es decir, el propio científico se



desplazaba a la estación de seguimiento y recibía los datos en el mismo momento de la medición. De ese modo las observaciones resultaban mucho más flexibles y podían ajustarse según fuese preciso.

La mayor flexibilidad del IUE dio asimismo origen al concepto de astrofísica de múltiples longitudes de onda, según el cual varios instrumentos en tierra y en el espacio se coordinan para observar un objeto de interés en multitud de frecuencias. Un caso típico fue el de la supernova SN1987A. Descubierta el 24 de febrero de 1987 desde el Observatorio de Las Campanas (Chile), fue prontamente examinada en otras longitudes de onda: el Observatorio Aerotransportado Kuiper se encargó del infrarrojo, el observador ultravioleta soviético ASTRON y el propio IUE lo observaron en el ultravioleta, el satélite japonés GINGA y la estación soviética MIR midieron emisiones de rayos X, y el observatorio solar

SMM (*Solar Maximum Mission*) de la NASA buscó emisiones de rayos gamma. Incluso el detector japonés Kamiokande II participó en la investigación desde la superficie terrestre y registró un conjunto de neutrinos procedentes de la supernova.

La misión del IUE, en principio programada para tres años, pasó por diversos ciclos de extensión y, aunque diversos componentes sufrieron daños, pudo seguir en funcionamiento hasta que los ajustes presupuestarios forzaron su desconexión en septiembre de 1996. Entre sus objetivos ilustres se contaron el cometa Halley, observado durante su perihelio de 1986, y el cometa Shoemaker-Levy, el cual fue seguido cuando colisionó contra Júpiter en 1994; otros cometas mostraron por primera vez emisiones de ultravioleta que revelaron la presencia de azufre y agua. También se examinaron casi todos los planetas del sistema solar, estrellas de gran luminosidad y los llamados cuásares, núcleos de galaxia activa increíblemente lejanos y brillantes.

Incluso en la actualidad el archivo de datos del IUE sigue siendo usado con regularidad. Fue, sin duda, el tipo de recurso que cualquier científico desea tener a mano y, por ello, la NASA no esperó a que acabase su periodo de funcionamiento para poner en órbita el EUVE (*Extreme Ultraviolet Explorer*). La denominación «extremo» hace referencia al rango de longitudes de onda observadas que, en esta ocasión, se ubicaban en el rango del ultravioleta extremo (7-76 nanómetros), cerca del dominio de los rayos X. Entre 1992 y 2002, el EUVE realizó un barrido completo del cielo, un segundo barrido en la región de la eclíptica y una serie de observaciones espectroscópicas de diversos cuerpos celestes, incluyendo el propio medio interestelar.

Al EUVE le siguió el FUSE (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*), construido por la NASA y con colaboración de las agencias espaciales francesa y canadiense. Entre 1999 y 2007 investigó en longitudes de onda de 90-120 nanómetros, es decir, en un rango algo menos «extremo» que el EUVE, y proporcionó abundante información sobre el medio interestelar e intergaláctico, regiones que hasta entonces se creían vacías de materia.

La combinación IUE-EUVE-FUSE cubrió casi todo el espectro ultravioleta y conforme su vida útil terminaba, otros ocupaban

su lugar. Algunos se diseñaron para objetivos específicos. Es el caso de GALEX (*Galaxy Evolution Explorer*), un telescopio utilizado para observación de galaxias; CHIPS (*Cosmic Hot Interstellar Plasma Spectrometer*), un pequeño satélite con la misión de investigar el espacio interestelar cercano; o Hisaki, un satélite en órbita baja lanzado por la agencia espacial japonesa para estudiar las atmósferas de los planetas de nuestro propio sistema solar. Otros países como Corea del Sur, India o Alemania también se han dedicado a construir y lanzar sus propios satélites, prueba de que la observación orbital en el ultravioleta es una parte fundamental del trabajo astrofísico moderno.

ONDAS-PARTÍCULA: RAYOS X Y GAMMA

Por debajo de los diez nanómetros de longitud las ondas electromagnéticas se comportan como partículas. Empieza entonces una región de energías crecientes cuyos límites son difusos pero que podemos clasificar en las categorías de rayos X (con longitudes de onda entre 0,01 y 10 nanómetros) y rayos gamma (menos de 0,01 nanómetros). Los rayos X tienen una gran capacidad de penetración, motivo por el que se han utilizado para sondear objetos tan diversos como tuberías de acero o el cuerpo humano. Los rayos gamma son aún más energéticos pero comparten propiedades físicas con los rayos X, motivo por el cual se tratarán aquí de forma conjunta.

Hace cien años, cuando se descubrieron los rayos X, las primeras fuentes que se encontraron fueron las que había en la superficie terrestre, en concreto elementos inestables que se desintegraban emitiendo radiación de alta energía. No fue hasta los años cincuenta cuando los físicos de altas energías comenzaron a buscar fuentes emisoras en el espacio exterior. Pero, de nuevo, al igual que sucede en otras muchas bandas de frecuencia, se encontraron con que la atmósfera terrestre bloquea eficazmente tanto los rayos X como los gamma.

Los primeros detectores de rayos X y gamma utilizaron globos y cohetes suborbitales, y en la década de los setenta

comenzaron a enviarse observatorios al espacio. Uno de los pioneros fue el Uhuru, lanzado por la NASA, el primer satélite diseñado específicamente para observaciones en rayos X. En poco más de dos años, fue capaz de detectar más de trescientas fuentes entre estrellas binarias, restos de supernova y galaxias. Pocos años después la agencia espacial estadounidense lanzó al espacio el HEAO-2, posteriormente rebautizado como Observatorio Einstein. Así, un nuevo satélite siguió a otro, hasta nuestros días.

El gran atractivo observacional de los rayos X y gamma consiste en que cuanto menor es la longitud de las ondas electromagnéticas tanto mayor es su energía, de modo que son representativos de sucesos de gran energía, o bien de muy alta temperatura. Ahora sabemos que el Sol es una fuente de rayos X porque, aunque la temperatura en su superficie es de unos 6000 grados, la corona solar contiene gases a temperaturas de varios millones de grados. Más lejos de nosotros, los agujeros negros (en la imagen superior de la página 113, una representación artística) atraen materia que, conforme cae en espiral, se calienta hasta el punto de generar rayos X.

Los rayos X y gamma son emitidos por sustancias radiactivas, lo que permite utilizarlos para localizar elementos químicos en la corteza de planetas, satélites y otros cuerpos rocosos, actuando así como una herramienta de prospección geológica. También pueden originarse en el Sol, pero las fuentes principales se hallan distribuidas por nuestra galaxia; son los llamados púlsares, estrellas compactas de gran densidad que emiten pulsos (de ahí su nombre) de radiación a intervalos regulares. Más lejos aún, en los confines del universo, los cuásares lanzan energía en cantidades casi inimaginables, entre la que se incluyen radiaciones de alta energía.

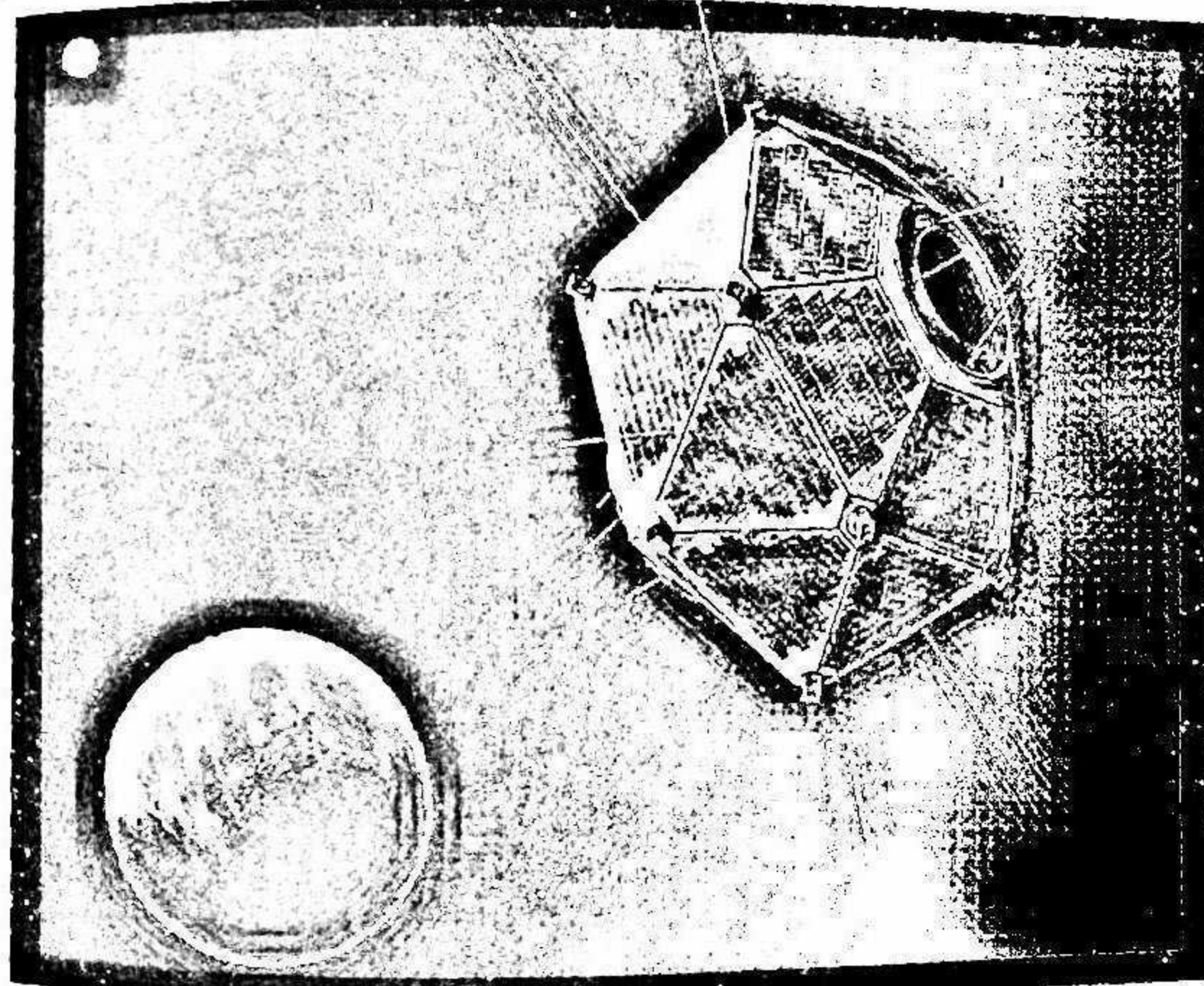
Otros lugares de producción de este tipo de radiación son los remanentes de supernova, estrellas de neutrones, algunos tipos de estrellas binarias, e incluso el espacio entre las galaxias, donde las partículas tienen una gran temperatura y energía. Sea cual sea su origen, las radiaciones X y gamma nos revelan el universo en sus escalas de energía más extremas.

¿ES UN GRB O UN ARMA NUCLEAR?

Para verificar que la Unión Soviética cumplía el tratado sobre prohibición de pruebas nucleares de 1963, Estados Unidos desplegó una serie de satélites de vigilancia de la clase Vela. El 2 de julio de 1967, los Vela 3 y 4 detectaron un repentino estallido de rayos gamma, una posible señal indicativa de una explosión nuclear de superficie, pero la duración e intensidad no eran las normales. Otros estallidos similares posteriores permitieron descartar la Tierra y el Sol como fuentes emisoras. El origen de los estallidos de rayos gamma o GRB (del inglés *Gamma Ray Bursts*) era un misterio. El número de eventos era al principio escaso y la procedencia de los rayos gamma no pudo establecerse con precisión.

Misterio esclarecido

La NASA combinó las mediciones de diversas sondas interplanetarias para restringir la zona de origen de los GRB, pero las observaciones realizadas en esas regiones no mostraban objetos dignos de interés. Investigaciones más recientes sugieren que esos estallidos de rayos gamma proceden de sucesos de alta energía como una explosión de supernova, el choque de estrellas de neutrones o de agujeros negros. Los satélites Vela (en la imagen), con fines militares, abrieron el camino a la astronomía de rayos gamma sin pretenderlo.



El proyecto Vela constó de doce satélites de fines militares que fueron lanzados en la década de 1960.

PARTÍCULAS SÚPER RÁPIDAS Y ENERGÉTICAS: RAYOS CÓSMICOS

Rivalizando en energía con los rayos X y gamma, aunque no son ondas electromagnéticas, los rayos cósmicos fueron un enigma científico durante muchos años. A comienzos del siglo XX se creía

La investigación de los posibles efectos de los rayos cósmicos sobre los organismos vivos generará un gran interés.

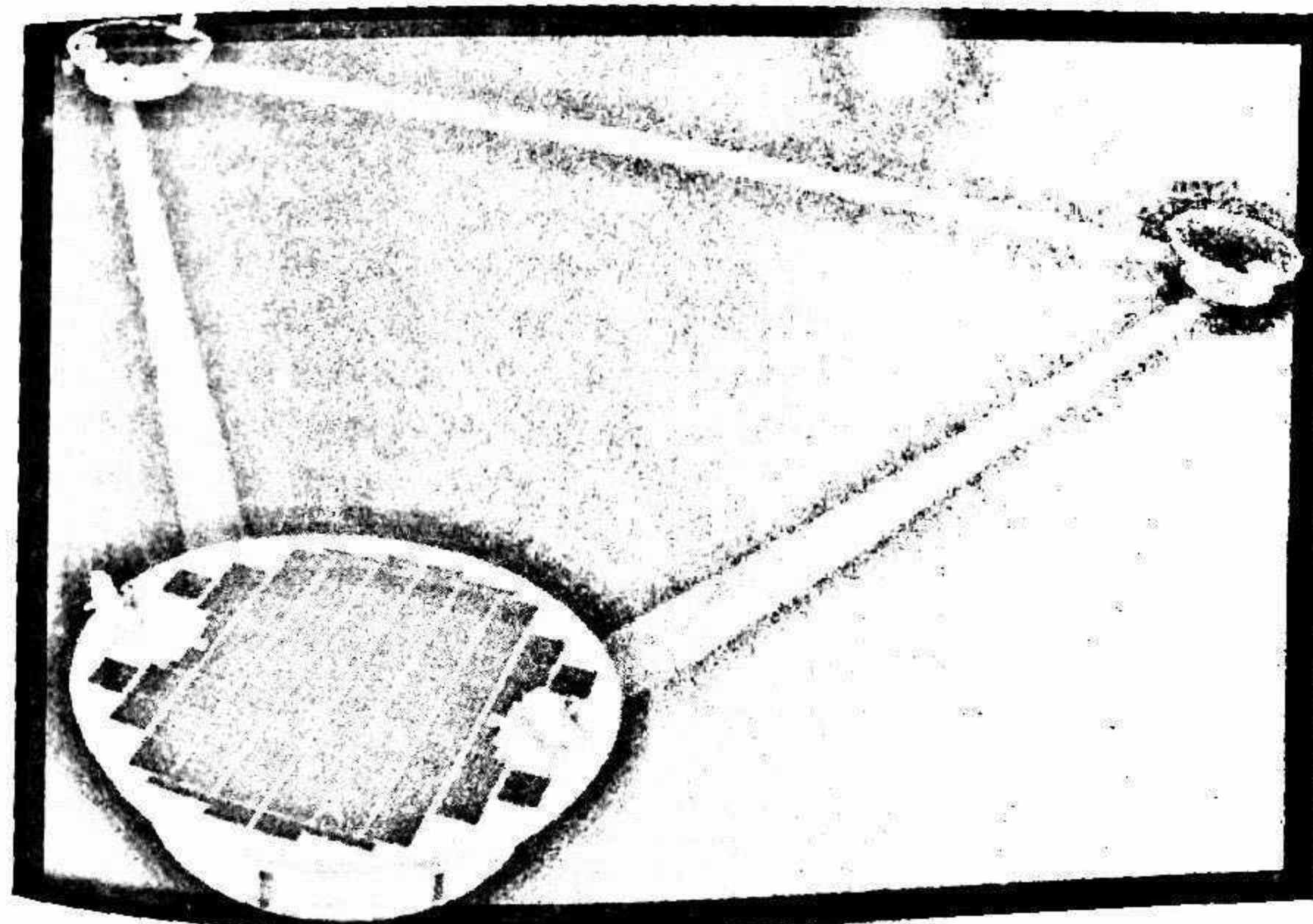
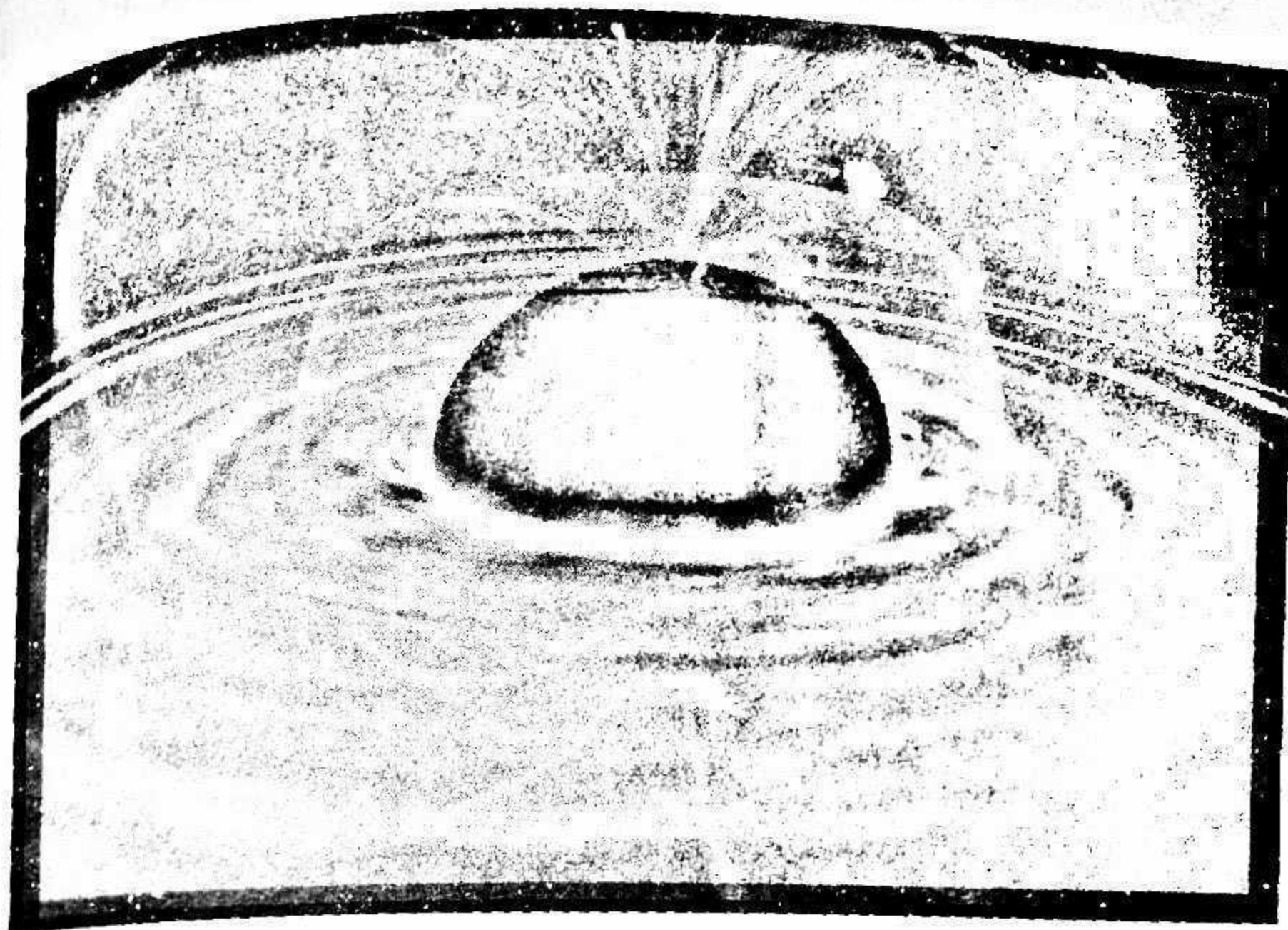
VICTOR HESS

que eran un tipo de radiación similar a los rayos X y se llevaron a cabo diversos experimentos para determinar sus propiedades. Su origen, sin embargo, era un misterio, ya que no parecía haber un proceso de desintegración nuclear que los generase.

Entre 1911 y 1913 el físico austriaco Victor Hess (1883-1964) montó un observatorio a bordo de un globo para medir rayos cósmicos. Si su origen era terrestre, se esperaba que la intensidad disminuyese con la altura. Y eso pareció en un principio, pero a altitudes superiores a los mil metros parecía que volvían a aumentar. Este incremento no parecía guardar relación con el Sol o la Luna. Parecía como si la atmósfera los produjera, pero... ¿cómo?

En la actualidad sabemos que los rayos cósmicos están formados por partículas con masa, sobre todo núcleos de hidrógeno y helio. Al penetrar en la atmósfera chocan con las moléculas de aire y producen un chorro de partículas de alta energía que ionizan el aire produciendo efectos similares a los rayos X y gamma. Eso significa que el término «rayo» no es adecuado, ya que suele reservarse a las ondas de tipo electromagnético, pero el nombre se sugirió antes de poder ser identificados y ha permanecido por inercia.

Si ya en los años treinta se conocía de modo aproximado el mecanismo de producción de los rayos cósmicos en la atmósfera terrestre, su origen es un misterio que sigue sin estar claro. Al tratarse de partículas con velocidades cercanas a la de la luz, no puede determinarse fácilmente la dirección de origen salvo con equipo pesado, difícil de enviar al espacio. Peor aún, las partículas que forman los rayos cósmicos están dotadas de carga positiva, lo que las hace susceptibles a cambios de dirección cada vez que



Arriba, representación artística de un agujero negro, una potente fuente de emisión de rayos X. Abajo, recreación artística del proyecto del observatorio de ondas gravitacionales LISA, que consta de tres naves espaciales en forma de disco.

entran en un campo magnético. Sin saber de dónde proceden, no puede sino conjeturarse cuál fue el proceso que los originó.

Hay algunos candidatos bastante firmes, como las supernovas y ciertos núcleos galácticos activos, pero también se pueden generar rayos cósmicos en llamaradas solares y en el medio interestelar (concretamente en la región donde el plasma interestelar colisiona con el generado por nuestro Sol). Para averiguar su origen, una de las mejores bazas consiste en observar objetos que emitan rayos gamma de gran energía, lo que presupone que cualquier proceso capaz de generarlos producirá asimismo grandes cantidades de rayos cósmicos.

Este es el propósito del telescopio de rayos gamma Fermi, lanzado en 2008 por la NASA. Los datos de Fermi han conseguido identificar restos de algunas supernovas como fuentes de rayos cósmicos, pero en modo alguno está claro que esos sean los únicos lugares donde puedan generarse.

ALTERACIONES DEL ESPACIO-TIEMPO: ONDAS GRAVITACIONALES

De modo similar a como las partículas eléctricamente cargadas pueden dar lugar a ondas electromagnéticas, las masas en movimiento alteran el campo gravitatorio. Dicha alteración puede propagarse por todo el espacio en forma de ondas gravitacionales. Se trata de una perturbación del propio espacio-tiempo, cuya detección nos proporcionaría una nueva forma de sondear el universo.

La existencia de las ondas gravitacionales fue predicha por la teoría de la relatividad general de Einstein, pero la dificultad para detectarlas las mantuvo en la categoría de conjetura hasta que en 2016 el observatorio estadounidense LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*) detectó el evento GW150914, una colisión entre agujeros negros que durante unos segundos emitió una serie de ondas gravitacionales con una energía superior a la producida por todo el resto del universo combinado. Pero tras viajar casi 1500 millones de años-luz, su intensidad era tan baja que apenas si lograron activar los detectores del observatorio LIGO.

Para aumentar la sensibilidad de los observatorios de ondas gravitatorias, estos se componen de diversos elementos a grandes distancias entre sí. Los tres mil kilómetros que separan las dos estaciones de LIGO pueden convertirse en distancias mucho mayores en el espacio y, con esa idea en mente, la NASA y la ESA desarrollaron el proyecto LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) (representado artísticamente en la imagen inferior de la página 113), un observatorio de ondas gravitacionales basado en tres sondas separadas entre sí una distancia de varios millones de kilómetros.

En 2011 LISA sufrió un golpe devastador: la NASA se retiró del proyecto y la ESA se vio incapaz de financiarlo en su totalidad. A pesar de ello, en diciembre de 2015 la agencia europea consiguió completar la primera fase con el lanzamiento de la LISA Pathfinder, una sonda diseñada para las técnicas necesarias para un observatorio espacial de ondas gravitacionales; pero LISA se ha reducido en tamaño y capacidad con cada nueva reformulación.

En la actualidad, LISA se encuentra en la lista de baja prioridad, y no parece que vaya a convertirse en realidad en un futuro próximo, pero su importancia es indudable. Se trata de abrir una nueva ventana al universo, una que no sea afectada por interferencias debidas a polvo o humo. La astronomía de ondas gravitacionales podría sondear el pasado hasta acercarse al Big Bang más que ninguna otra forma de observación, una misión cuyo desarrollo deberá tener lugar, de forma indudable, en el espacio.

El ser humano en el espacio

Como en cualquier colonización pasada, si queremos conquistar el espacio habrá retos que superar, sean de tipo médico o fisiológico o de índole social. En todo caso, antes de hacer turismo espacial, hacer minería en un asteroide o pasar una luna de miel en gravedad cero valdrá la pena repasarlos.

Sin duda, somos criaturas con una gran capacidad de adaptación al medio. Y bastante ingeniosos. Gracias a nuestra capacidad cerebral, tenemos ropa que nos mantiene calientes, coches que nos transportan a gran velocidad y granjas que nos proporcionan alimentos. A lo largo de los siglos la especie humana se ha extendido por todo el globo, y allí donde las condiciones ambientales son demasiado duras para establecer asentamientos permanentes hemos erigido estructuras y viviendas temporales.

Durante la larga era de exploración de los continentes terrestres, aquellos expedicionarios pioneros se encontraron con paisajes diferentes a los de su hogar. Sin embargo, estaban constituidos por elementos comunes: la gravedad, la presión atmosférica, la mayoría de los fenómenos meteorológicos... Nada de eso sucede fuera de la Tierra. No es solo que los cuerpos celestes sean radicalmente distintos a nuestro hogar planetario; también lo es la ausencia misma de esos cuerpos, el vacío: el espacio en sí. El mero hecho de abandonar la superficie terrestre somete al cuerpo humano a condiciones límite. Por todo ello, la exploración humana del espacio conlleva sus propias normas en lo que a aspectos médicos y fisiológicos respecta.

QUÉ PASA CUANDO ABANDONAMOS LA BIOSFERA

La primera etapa de un vuelo espacial, el despegue, es un suceso extremo para un ser humano debido a la aceleración que los astronautas han de soportar. Los efectos de esos bruscos cambios de velocidad son bien conocidos por los conductores de competición y pilotos aéreos. Precisamente, uno de los factores limitadores de la eficacia de un caza de combate es la aceleración que puede soportar el piloto, que suele medirse en factores de fuerza G (un G es igual a la aceleración de la gravedad, de $9,8 \text{ m/s}^2$ en la superficie terrestre).

Por lo general, las aceleraciones no gravitatorias a que estamos sometidos suelen ser bastante reducidas. Curiosamente, los parques de atracciones nos resultan atractivos porque inducen aceleraciones a las que no estamos acostumbrados, aunque alcanzan unos valores de intensidad y duración que son seguros tanto para el cuerpo como para la mente. Pero las aceleraciones de 5-6 G producen visión borrosa y pérdida de la conciencia. En casos más graves, como durante un accidente de automóvil, las fuerzas resultantes de la deceleración son tan altas que pueden producir lesiones graves o incluso la muerte; para evitarlo se utilizan sistemas de retención como airbags y cinturones de seguridad, que prolongan el tiempo de frenado, disminuyendo con ello el valor promedio de las fuerzas de deceleración que actúan sobre los pasajeros.

La aceleración sufrida por un astronauta durante el despegue no supera la de algunas atracciones como las montañas rusas, pero su duración es mayor, por lo que es preciso tomar precauciones. Uno de los pasos que ha de seguir un astronauta durante su periodo de entrenamiento es someterse a la centrifugadora para comprobar que es capaz de soportar los cambios bruscos de velocidad inherentes a un vuelo al espacio. Puesto que las fuerzas de aceleración más peligrosas para el cuerpo humano suceden a lo largo del eje longitudinal (de cabeza a pies), los viajeros espaciales suelen comenzar su viaje tendidos en posición horizontal.

Una vez alcanzada la órbita baja, el viajero se encuentra en un estado de gravedad cero. En ese momento, su situación es

idéntica a la de una persona que se encuentre en un ascensor cuyo cable se ha roto y que se desploma sin control. Mientras una nave en órbita está cayendo, su movimiento lateral le impide chocar contra el suelo, de forma que una persona en su interior se encuentra en caída libre y siente que la gravedad ha desaparecido. En realidad, está sometido a casi la misma fuerza gravitatoria que en la superficie, por lo que resulta más correcto hablar de *ingravidez aparente*.

Las situaciones más parecidas a la ingravidez en tierra serían actividades como el buceo submarino o el paracaidismo, e incluso esta analogía es incorrecta, ya que existen fuerzas (como el empuje de Arquímedes o la fuerza de viscosidad del aire) que compensan las de gravedad. En el espacio, por el contrario, no hay fuerzas que contrarresten a la gravedad; el empuje de Arquímedes no existe en una bañera espacial, la silla no sustenta el peso del astronauta y el suelo no ejerce fuerza contra él. El cuerpo humano, en resumen, no está preparado para vivir sin gravedad, y eso dificulta la vida en el espacio. Medio siglo de viajes al espacio han permitido a los fisiólogos estimar los efectos de la ingravidez sobre el cuerpo humano y determinar los peligros subyacentes incluso en viajes de corta duración.

Desde los primeros minutos de ingravidez hasta algunos días después, la ausencia de arriba y abajo puede producir problemas de orientación, mareos y náuseas. Los ritmos circadianos se desincronizan en un ambiente como el de la órbita baja, donde el día y la noche se suceden cada 45 minutos; combinado con la aparición de destellos de luz debidos al paso de rayos cósmicos que impactan en los ojos del astronauta, el resultado es una temporada de falta de sueño.

A continuación vienen los problemas de adaptación de fluidos. En la superficie terrestre la sangre se suele concentrar en la parte inferior del cuerpo; en el espacio el flujo sanguíneo se redistribuye, aumentando la presión en el torso y cabeza. El cuerpo interpreta esta situación anómala reaccionando para reducir la cantidad de sangre en la parte superior del cuerpo, con lo que el volumen de sangre disminuye.

A largo plazo el sistema inmunitario pierde parte de su efectividad. Los huesos pierden calcio y se hacen más frágiles, como les sucede a los ancianos aquejados de osteoporosis. Sin la necesidad de luchar contra la gravedad, los músculos se atrofian y pierden masa y, para evitarlo, los astronautas deben realizar ejercicio físico durante 1-2 horas diarias; de otro modo se arriesgan a perder hasta un 5% de masa muscular cada semana. La pérdida de masa ósea y muscular es algo que no puede recuperarse fácilmente y, tras un periodo de ingravidez de varios meses, es necesario un proceso de adaptación en tierra que puede llegar al año.

La habitabilidad del espacio se ve comprometida por la ausencia del doble escudo protector formado por la atmósfera y la magnetosfera, que reducen la radiación procedente del espacio a niveles aceptables, salvo en algunas bandas de frecuencia como la ultravioleta. En órbita baja la magnetosfera terrestre protege a los astronautas de la mayoría de las partículas del viento solar, pero más allá esa protección desaparece y el cuerpo humano puede verse sometido a altas dosis de radiación en viajes largos, como sería el caso de un vuelo a Marte. Los escudos antirradiación requieren el uso de material muy denso, como el plomo, lo que dificulta la tarea de enviarlos al espacio.

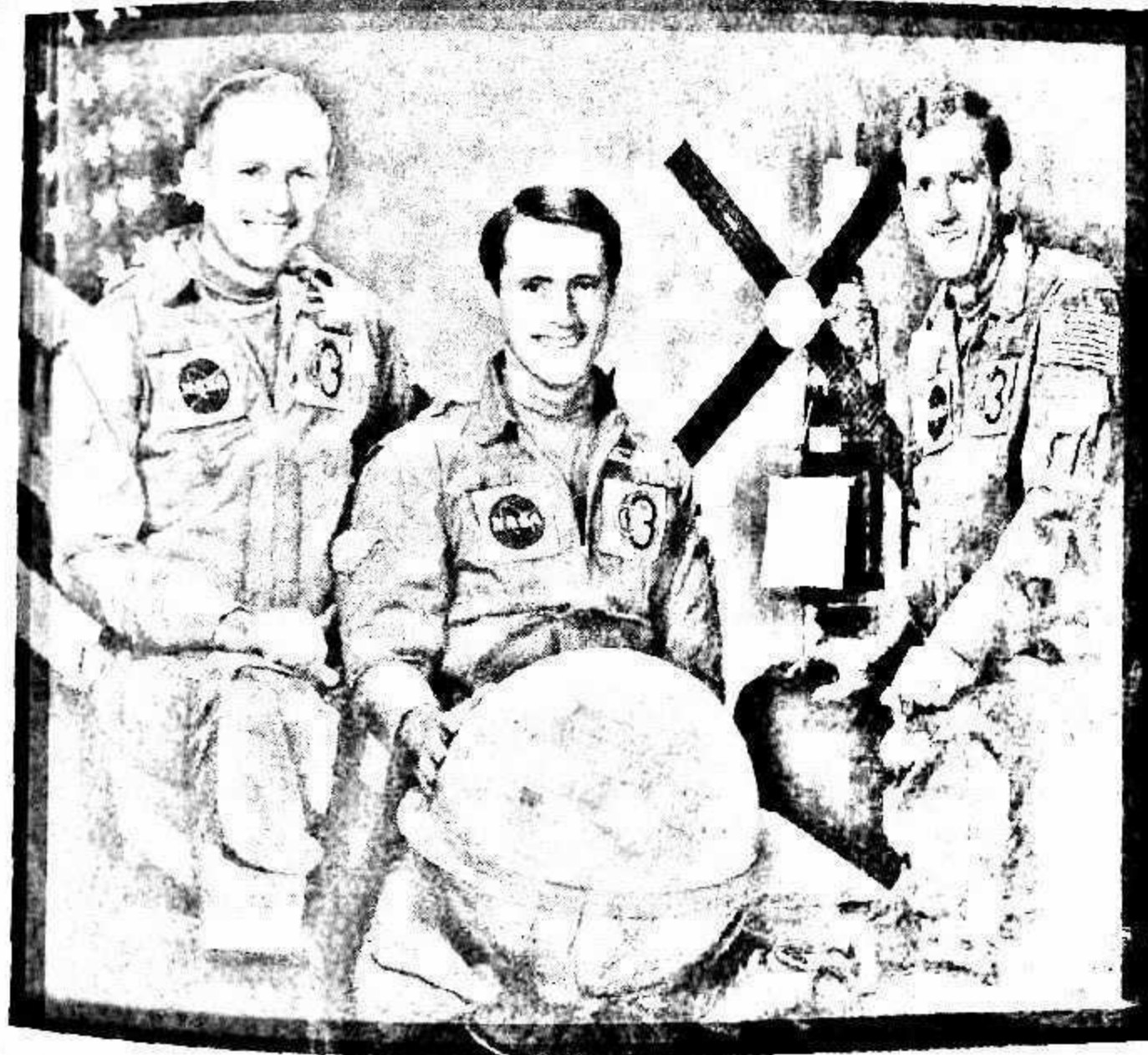
Otros problemas son de tipo psicológico. El proceso de reciclado extremo necesario en un entorno cerrado puede resultar desagradable cuando, por ejemplo, uno descubre que tiene que beber su propia orina reciclada, por muy purificada que esté. El «subidón» de estar en el espacio puede dar lugar en ocasiones a periodos de ansiedad o depresión. Existen efectos adversos de índole social, comunes a los entornos lejanos y aislados como bases de investigación antártica o plataformas petrolíferas. Si un largo viaje en coche puede poner a un matrimonio al borde del divorcio, no hay más que imaginar la tensión sufrida cuando un grupo de personas de diferentes culturas ha de convivir durante largos periodos de tiempo en un hábitat de tamaño limitado, en virtual confinamiento, con periodos de sueño desconectados de los ciclos habituales de día y noche, separados de la familia y los amigos, sometidos a largas jornadas laborales y al escrutinio público en un ambiente peligroso.

EL MOTÍN DEL SKYLAB

Las condiciones de trabajo en el espacio pueden perturbar las mentes más lúcidas y, a pesar de los estrictos controles físicos y mentales en la selección de los astronautas, a veces hay problemas laborales en el espacio. Eso es lo que ocurrió el 28 de diciembre de 1974, cuando los astronautas de la NASA Gerald Carr, Edward Gibson y William Pogue (en la imagen), a bordo de la estación espacial Skylab, decidieron que no aguantaban más. Durante meses y medio habían sido sometidos a una carga de trabajo excesiva, con turnos de 16 horas diarias que les obligó a sacrificar su tiempo de descanso. Era sencillamente imposible cumplir todas las tareas asignadas a los astronautas, pero los controladores en tierra los acusaron de lloricas y desatendieron sus quejas. La tensión se acumulaba.

Astronautas en huelga

Finalmente los tripulantes del Skylab tomaron una decisión insólita en los anales de la exploración espacial: se amotinaron. Desconectaron la radio, dejaron de trabajar y durante un día entero se limitaron a disfrutar del tiempo libre. Tras el día de descanso no programado se les permitió algunos lujos como disfrutar el tiempo de comida sin trabajo extra, se les aligeró la carga de trabajo y, como resultado, la productividad del equipo aumentó. Fue la última misión del Skylab, y también la de Carr, Gibson y Pogue. Aunque batieron un récord de permanencia en el espacio su motín no quedó sin castigo. Jamás volvieron a viajar al espacio. Tres años después de su vuelta a la Tierra todos habían dimitido de la NASA.



Gerard Carr, Edward Gibson y William Pogue, tripulantes del Skylab en diciembre de 1974.

ALGUNAS VENTAJAS TIENE EL ESPACIO

Las sondas no tripuladas están explorando el sistema solar, desde la órbita terrestre baja hasta más allá de Plutón, de forma eficiente y relativamente barata. Lógicamente, un vehículo autónomo robotizado puede someterse a mayor grado de peligro que una nave con astronautas, y ser enviado a una misión de décadas de duración sin posibilidad de regresar, ya que, si se pierde, se puede reemplazar; los seres humanos, por el contrario, necesitan un entorno de vida caro en términos de dinero y material, no pueden realizar misiones solo de ida (salvo que nuestro sentido de la ética y moral se relaje bruscamente) y sus cuerpos son mucho más frágiles. Considerando las dificultades inherentes al vuelo espacial tripulado, la cuestión que se plantea es: ¿hasta qué punto tiene sentido enviar seres humanos al espacio?

A despecho del mito del astronauta de nervios de acero y mente aguda, la mayoría de las tareas que pueda desempeñar en el espacio son asumibles por ordenadores, que presentan mayor eficiencia y menor probabilidad de error. Las máquinas no se cansan, no cometen errores de juicio, no se dejan llevar por los prejuicios y no necesitan horas de sueño o días de descanso. Por otro lado, la mente humana es capaz de resolver problemas con imaginación y creatividad, y el astronauta de carne y hueso seguirá siendo insustituible en una estación espacial por muy automatizada que esté.

Algunos estudios relacionados con la estancia prolongada en el espacio tienen aplicaciones en la Tierra. El más conocido es el relativo a la pérdida de masa ósea y muscular. Los problemas con que se enfrentan los astronautas cuando sus huesos se descalcifican son comunes a millones de personas que sufren osteoporosis, particularmente ancianos, por lo que cualquier solución para mejorar el bienestar de los astronautas en ese sentido tendrá un gran impacto sobre la calidad de vida de grandes segmentos de población. La diferencia estriba en que la vida en gravedad cero desgasta el hueso de forma controlable, de forma que un astronauta se convierte en un conejillo de indias gracias al cual se pueden estudiar los efectos de la osteoporosis desde su inicio.

Algunos experimentos llevados a cabo por astronautas a bordo de la Estación Espacial Internacional han mostrado que la pérdida de masa ósea puede reducirse mediante la ingesta de calcio y vitamina D, combinada con ejercicio físico y una dieta adecuada; un medicamento llamado osteoprotegerina, probado en el espacio, se ha revelado como alternativa al clásico bifosfonato usado para el tratamiento de la osteoporosis.

Otros beneficios médicos en la Tierra provienen del hecho de que los astronautas no tienen acceso rápido a un cirujano en el espacio. Una posibilidad sería el uso de cirujanos robots. La agencia espacial canadiense,

cuyo brazo robótico se usó en el transbordador espacial norteamericano con notable éxito, decidió financiar una iniciativa para crear un brazo robótico que pudiera ser operado desde tierra de forma fiable y segura. El resultado se llama *neuroArm*. Sus sensores de fuerza permiten al cirujano que lo maneja tener la sensación de presión, como si este estuviera tocando realmente el cuerpo del paciente, y su precisión es tal que puede ser utilizado en neurocirugía mientras el paciente está siendo sometido a una resonancia magnética. En 2008 fue usado con éxito para eliminar un tumor cerebral del cerebro de un paciente; en esa ocasión el cirujano manipuló el *neuroArm* desde la habitación contigua, pero en principio nada impide que se encuentre en otra ciudad, incluso en otro país.

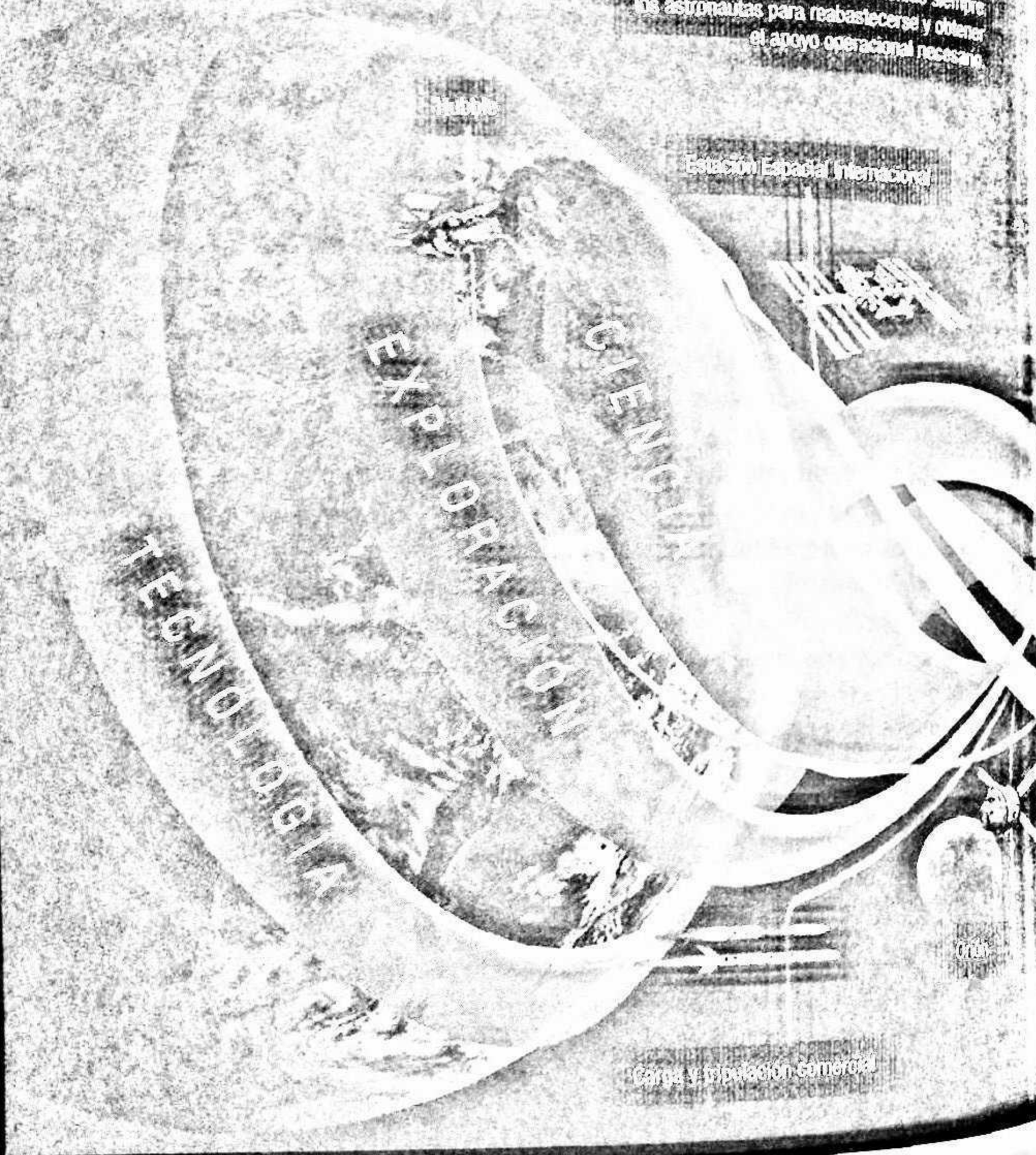
Uno de los motivos para ir al espacio es tan antiguo que ha sido el origen de viajes desde el inicio de los tiempos: porque está ahí. Si los amantes de las aventuras extremas se gastan su dinero en subir el Kilimanjaro y los turistas en visitar las pirámides de Egipto, ¿qué decir de un ambiente en gravedad cero con las mejores vistas imaginables? Los testimonios de los astronautas coinciden en la fragilidad que la Tierra aparenta desde el espacio, donde la falta de fronteras visibles y la pequeñez del ser humano a escala cósmica inducen en el viajero un sentimiento de espiritualismo y conciencia planetaria abrumador. Eso por no hablar de las innegables ventajas de una luna de miel en el espacio.

(En el Skylab 4) estábamos sobrepasados. Todo el día en continuo ajetreo, llevando a cabo una labor dura y tediosa. Aunque la vista era espectacular.

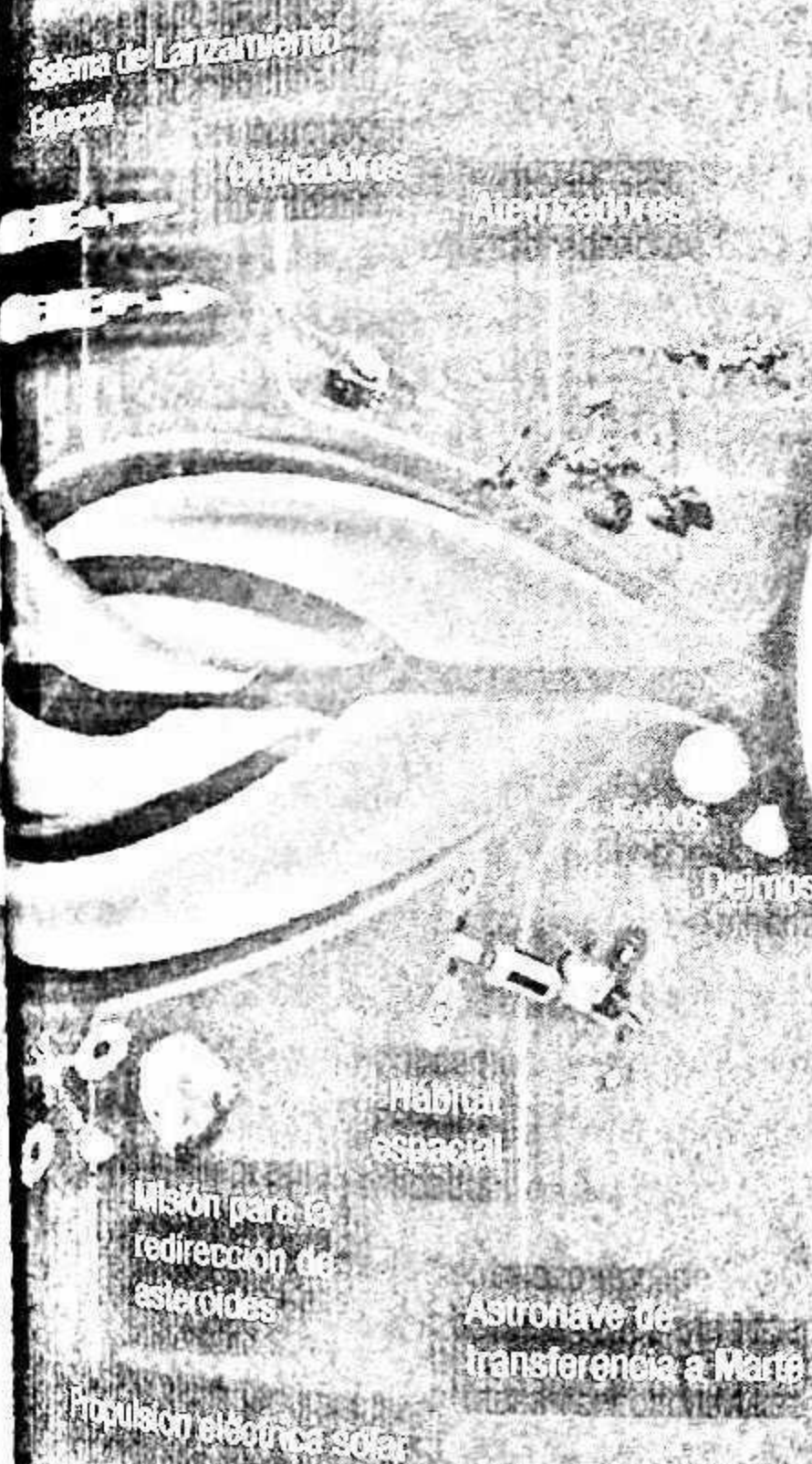
WILLIAM POGUE, ASTRONAUTA

PREPARATIVOS PARA LA ODISEA ESPACIAL A MARTE

Si realmente vamos a ir a Marte, deberemos asegurar la viabilidad tecnológica de tanta misión. Pero también se deberá superar la dependencia de la Tierra que, hasta ahora, han tenido siempre los astronautas para reabastecerse y obtener el apoyo operacional necesario.



La NASA está en ello y trabaja en múltiples desarrollos tecnológicos (trajes espaciales, naves, aterrizadores, lanzaderas, propulsión fotoeléctrica, orbitadores...) y lleva a cabo en la Estación Espacial Internacional programas para aumentar la autonomía de los astronautas. Para probar la tecnología necesaria para llegar al planeta rojo tiene en mente la denominada Misión de Redirección de Asteroides. ¿Su objetivo? Lanzar una sonda que capture un trozo de asteroide y lo acerque hasta un punto donde pueda ser recogido por una misión regulada y así, ser estudiado en profundidad.



El turismo espacial comenzó a tomar impulso a comienzos de los años noventa. Con la desintegración de la Unión Soviética y el caos económico subsiguiente, Rusia se mostró más flexible respecto a la idea de enviar a un turista a su estación orbital Mir y aceptó la oferta del millonario estadounidense Dennis Tito. Aunque la Mir fue retirada por la imposibilidad de mantenerla, Tito se mantuvo en sus trece y en abril de 2008 se convirtió en el primer turista espacial en viajar a la Estación Espacial Internacional (véase la imagen inferior de la pág. 131). Otras seis personas siguieron su ejemplo desde entonces, pagando cada uno de ellos entre 20 y 40 millones de dólares por el privilegio de convertirse en astronautas temporales.

Con la retirada de la flota de transbordadores en 2011, la NASA ha buscado formas de evitar el monopolio ruso de viajes al espacio, y en los últimos años ha surgido un grupo de empresas dispuestas a prestar servicios para el transporte de personas y material al espacio. Hay un claro negocio en enviar satélites o suministros a la órbita baja, pero lo que realmente capta la imaginación del ciudadano de a pie es la posibilidad de viajar al espacio como turista.

Diversas empresas compiten en la actualidad por ser los primeros en enviar naves tripuladas al espacio. La meta inmediata es ganar contratos de la NASA para enviar astronautas a la Estación Espacial Internacional, pero la misma nave puede ser modificada y usada para viajes turísticos cortos. Elon Musk, el propietario de SpaceX, afirma que sus naves (en la imagen superior de la pág. 131, la nave de carga Dragon) podrán enviar viajeros no solo a la órbita baja sino también a un vuelo alrededor de la Luna, e incluso tiene planes para establecer una colonia en Marte. En un plano más modesto, Virgin Galactic prepara vuelos suborbitales de corta duración a la atmósfera superior.

VIVIR EN EL ESPACIO

Los ingenieros saben cómo crear campos eléctricos o magnéticos, pero la única forma de hacer un campo gravitatorio es apilar una gran cantidad de materia. Eso significa que un astronauta puede,

en principio, agarrarse al suelo por medio de botas magnéticas pero seguirá sin sentir los efectos de la gravedad, con los efectos fisiológicos que ello comporta. Hay una forma de simular los efectos del tirón gravitatorio, y es sustituirlo por alguna otra fuerza. Una persona en el interior de una estructura en rotación sentiría una fuerza no inercial de tipo centrífugo, de modo similar a la que sentiría un pasajero que nota que se sale por la tangente cuando el vehículo toma una curva.

Las estaciones orbitales de gran tamaño son moneda corriente en el cine de ciencia ficción. Las posibilidades de la tecnología nos limitan por el momento a estructuras más modestas, pero las matemáticas son sencillas: un cuerpo siguiendo una circunferencia de radio R a una velocidad V induce una aceleración centrípeta $a = V^2/R$. La estructura puede ser tan compleja como alcance la imaginación, o tan sencilla como la que constituyen dos módulos unidos entre sí por un cable.

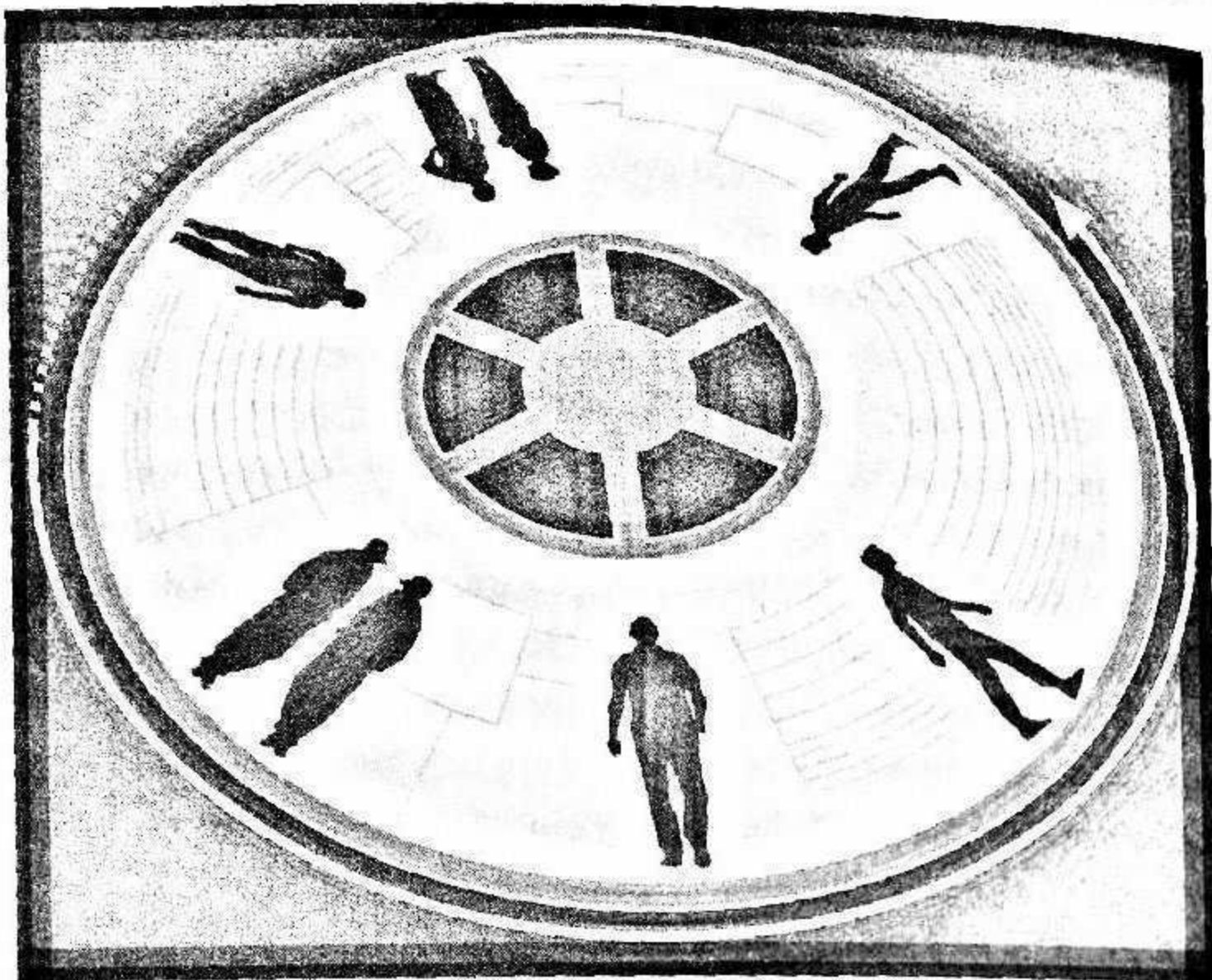
Muchos de los problemas estructurales con que los arquitectos e ingenieros tienen que lidiar en tierra desaparecen en la Estación Espacial Internacional que, en esencia, es un conjunto de módulos acoplados entre sí. Una estación en rotación dispondría de una estructura reforzada para evitar que los distintos módulos salgan despedidos por la tangente (figura 1). Las naves de entrada y salida atracarían en una zona central, donde se realizarían los experimentos en gravedad cero. Una solución mixta puede pasar por la construcción de una doble estructura con secciones en rotación para albergar la vivienda de los astronautas y una zona de ingravidez donde realizar los experimentos.

Si la estructura en rotación es de tamaño reducido aparecen otros problemas derivados de las fuerzas no inerciales. La mayor dificultad puede provenir de las llamadas *fuerza de marea*. En la superficie terrestre, una persona de pie tiene su cabeza algo más lejos del centro de la Tierra que sus pies, lo que significa que el tirón gravitatorio sobre ambas partes del cuerpo es distinto. El pequeño tamaño de un ser humano respecto al radio de la Tierra hace que esa diferencia de fuerzas (llamada fuerza de marea)

Un futuro emocionante e inspirador
pasa por una civilización espacial.

Elon Musk

FIG. 1



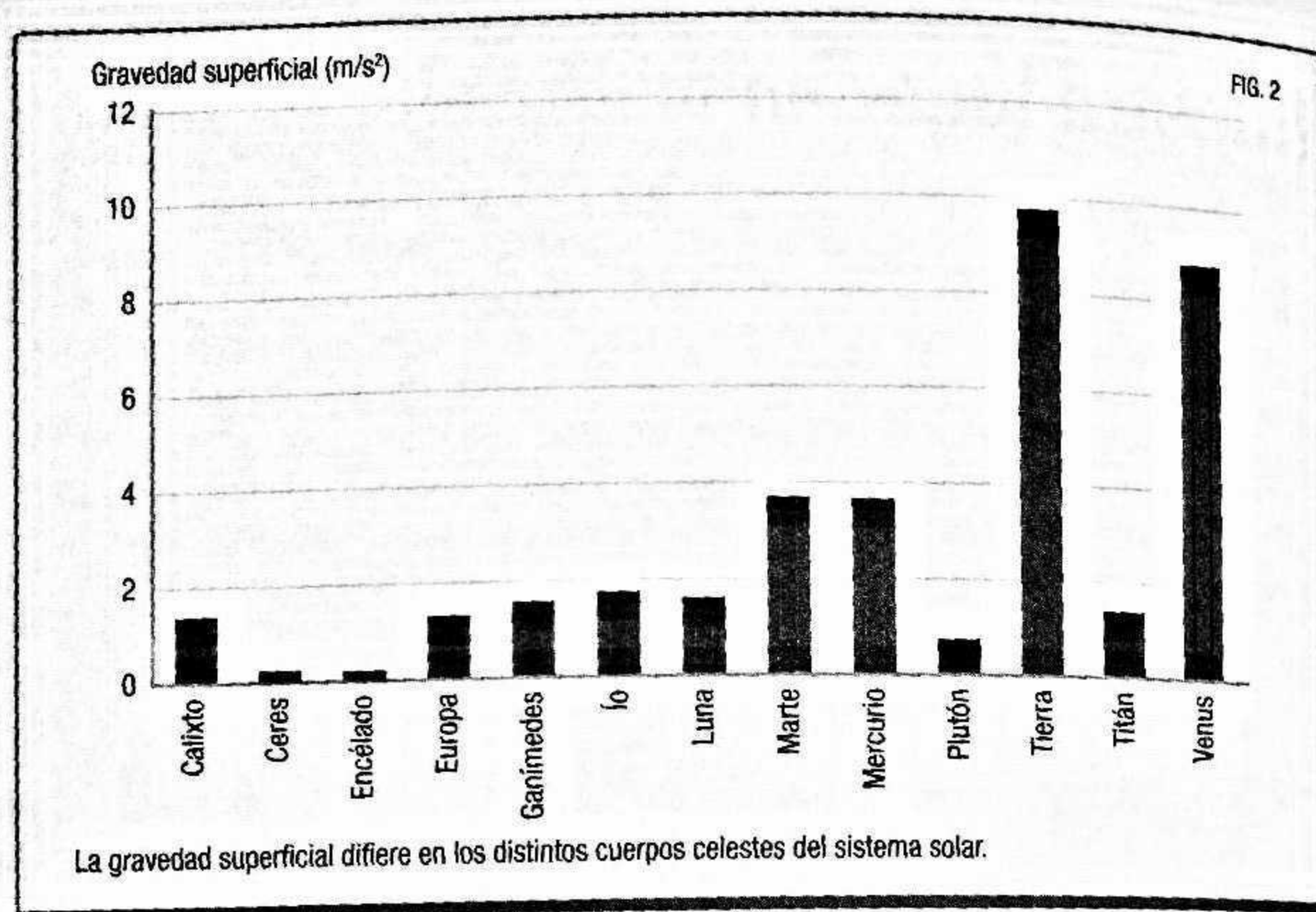
Para contrarrestar los perjuicios que los astronautas sufren en ausencia de la fuerza de la gravedad se podría construir una estación espacial con una fuerza que induzca una gravedad aparente: la rotación.

sea muy pequeña, pero en una estación en rotación la cabeza y los pies estarán sometidos a fuerzas centrífugas muy diferentes, a no ser que la estación tenga un tamaño de varios kilómetros. Una exposición a fuerzas diferentes durante periodos prolongados de tiempo trae sus propios problemas, que ni siquiera han sido planteados con detalle por falta de datos experimentales.

A pesar de los problemas expuestos, un núcleo central ingravido unido a una estructura rotatoria que induzca una gravedad aparente parece ser la única salida viable a la presencia del ser humano por largos periodos de tiempo. Las aplicaciones prácticas comienzan por los vuelos espaciales de larga duración necesarios para alcanzar otros planetas de nuestro sistema solar, pero no acaban ahí. Una vez el ser humano se establezca en otros mundos, estará sometido a otras fuerzas gravitatorias.



Arriba, nave de carga Dragon, de la empresa SpaceX, acoplada al brazo robótico de la Estación Espacial Internacional. Abajo, el turista espacial Dennis Tito, a la izquierda, junto al comandante de vuelo y el ingeniero espacial.



Venus tiene una gravedad superficial (figura 2) casi igual a la de la Tierra. En cambio, en Mercurio o Marte el tirón gravitatorio será de apenas el 40% del terrestre.

En lo que respecta a otros destinos, la gravedad superficial en la Luna es un sexto de la terrestre, y en los grandes satélites de Júpiter o Saturno es aún menor; en cuanto a los asteroides, su campo gravitatorio es testimonial cuando lo comparamos con el de la Tierra. Eso implica que un hábitat permanente necesita una gravedad artificial como la producida por una estructura en rotación para albergar humanos de manera permanente.

Hay gran cantidad de materias primas en el sistema solar listas para ser usadas, y que en el futuro pueden representar cuestión de vida o muerte para los terrícolas: agua, hidrocarburos, metales. Sobre todo, nuestro sistema solar está lleno de espacio, desaprovechado hasta ahora. Considerando la tradición humana de explorar y asentarse, la expansión al espacio no debe plantearse en términos de por qué debería hacerse, sino de cómo debería hacerse. Es solo cuestión de tiempo.

Nuestro lugar en el cosmos

Algún día fabricaremos medicamentos y nuevos materiales en el medio espacial. De él obtendremos también toda la energía necesaria y, más pronto que tarde, explotaremos los recursos mineros del sistema solar. No habrá límites, más allá de los de nuestra imaginación.

Algunas de las propiedades que hacen del espacio un lugar difícil para vivir son, paradójicamente, las mismas que aumentan su valor como lugar de fabricación. Por ejemplo, en el entorno ingravido del espacio un cristal puede crecer y desarrollarse de forma mucho más perfecta que cuando está sometido a la gravedad terrestre, los metales se combinan en aleación con un mayor grado de homogeneidad y un medicamento puede elaborarse mediante un control más exacto de los productos químicos que lo componen. Parece que el espacio es el polígono industrial ideal.

Sin embargo, estas afirmaciones ya se hicieron en el pasado, y no siempre se han cumplido. Un ejemplo es el de la industria microelectrónica. En los años ochenta, mientras los hogares del mundo se llenaban con los novedosos ordenadores personales, se creía que el espacio sería el lugar ideal para fabricar obleas de silicio ultrapuro para los futuros microchips. Treinta años después los chips de nuestros ordenadores y dispositivos móviles son mil veces más rápidos, pero las mejoras no provinieron del espacio sino de los avances en las técnicas de fabricación tradicional. Los fabricantes de microelectrónica prefirieron esa estrategia en lugar de arriesgarse con aventuras espaciales.

Aún sueño con que estoy en la Estación Espacial Internacional sin sentir mi peso. La ingravidez es la sensación más increíble, relajante y natural que existe.

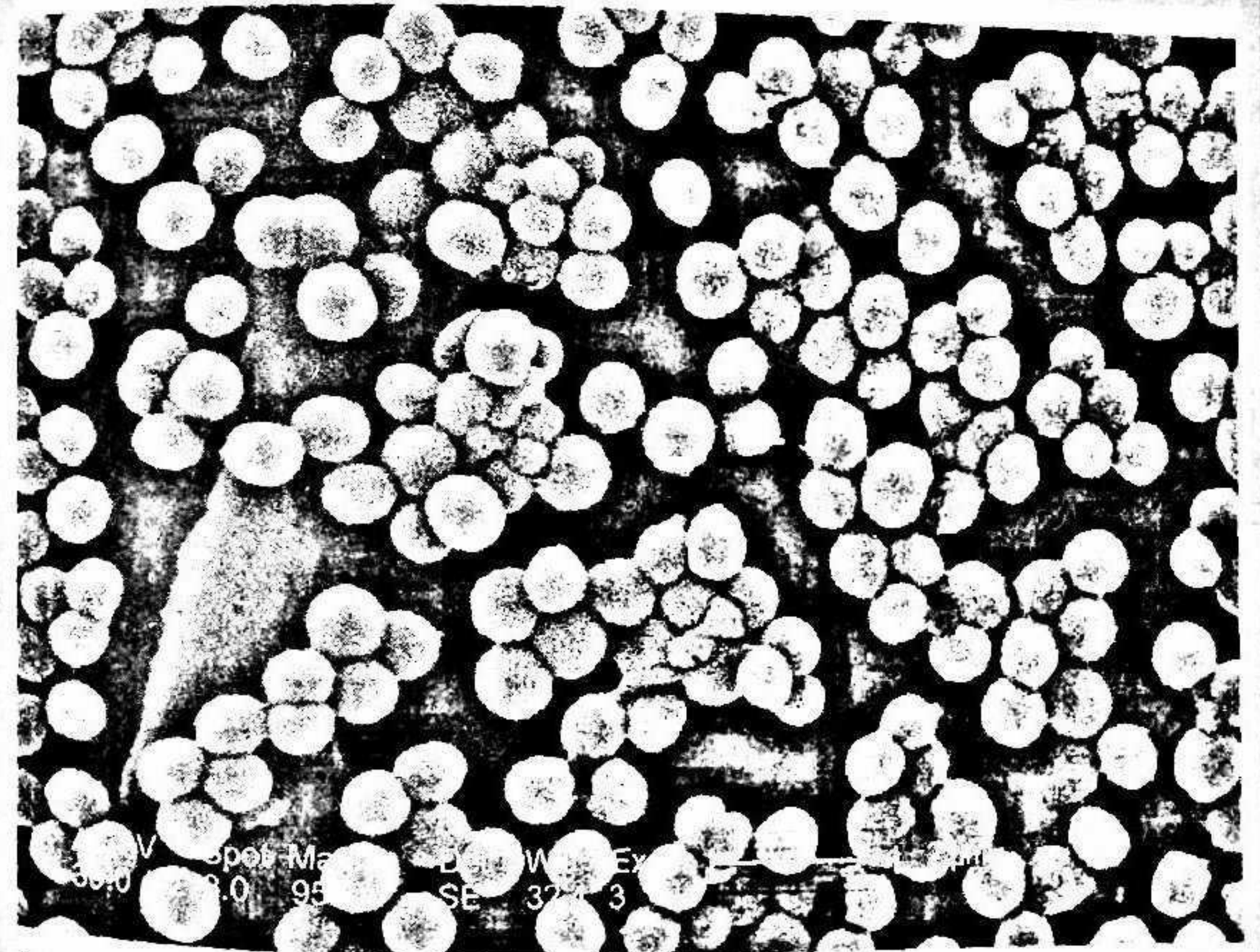
sos extremos, un sistema cristalino en proceso de solidificación puede perder sus propiedades debido a la tensión inducida por su propio peso.

Por estos y otros motivos, la órbita baja es un lugar idóneo para realizar experimentos de ciencia de materiales. Ya en los años setenta la estación espacial estadounidense Skylab fue equipada con una instalación para el procesado de material a altas temperaturas, lo que permitió iniciar la investigación en la síntesis de materiales en gravedad cero. En los años ochenta y noventa diversas misiones del transbordador incluyeron experimentos similares como parte habitual de sus actividades científicas.

En la actualidad la Estación Espacial Internacional alberga varios experimentos sobre ciencia de materiales gracias al módulo de investigación MSRR-1 (*Materials Science Research Rack-1*). Desarrollado por la NASA y la ESA, es capaz de albergar diversos submódulos intercambiables entre los que se incluyen el laboratorio de ciencias de materiales MSL y dos hornos capaces de superar la temperatura de fusión del hierro con una precisión inferior a 0,02 °C, en cuyo interior los líquidos pueden mezclarse de forma controlada mediante el uso de campos magnéticos.

A comienzos de 2017 una octogenaria norteamericana falleció tras haber sido infectada por la bacteria *Klebsiella pneumoniae*, contraída durante una visita a la India. Los médicos le administraron un total de 26 antibióticos distintos. Ninguno resultó efectivo, ni siquiera los llamados antibióticos de último recurso, considerados como la última línea de defensa en la lucha antibacteriana. Cada vez un porcentaje mayor de las bacterias perjudiciales para el ser humano han desarrollado multirresistencia (en la imagen, una) a la mayoría de los antibióticos existentes. Algunos investigadores opinan que deberíamos recurrir al espacio para ganar la guerra contra las bacterias.

En febrero de 2017 una muestra de estafilococo multirresistente fue enviada a la Estación Espacial Internacional para su estudio. Se cree que las condiciones de microgravedad pueden acelerar las tasas de mutación bacterianas, y estudiarlas antes de que se produzcan en la Tierra ayudará a desarrollar mejores fármacos. Ya en 2006 y 2008 se enviaron muestras de salmonela que, tras algún tiempo en condiciones de microgravedad, mostraron un aumento en su virulencia. El experimento logró identificar la proteína responsable del cambio, lo que es de gran utilidad para controlar esas mismas cepas en la Tierra.



Cepa de bacterias *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (MRSA).

Una de las incógnitas que presenta el ambiente espacial es su efecto a largo plazo sobre los materiales usados en la construcción de satélites y naves espaciales. Todo se gasta y se erosiona, también en el espacio, y los materiales que allí se utilicen han de poder resistir condiciones extremas de temperatura, presión, radiación y exposición a micrometeoroides. Para evaluar las características de los materiales y su evolución en el espacio la NASA puso en órbita en abril de 1984 el LDEF (*Long Duration Exposure Facility*) (véase la imagen superior de la pág. 141), un gran satélite de casi diez toneladas de masa que albergaba diez mil muestras de todo tipo, tanto vivas como inertes. La misión inicial se programó con una duración inferior a un año, pero los retrasos impuestos por la explosión del transbordador *Challenger* en enero de 1986 pospusieron la recuperación del LDEF hasta 1990.

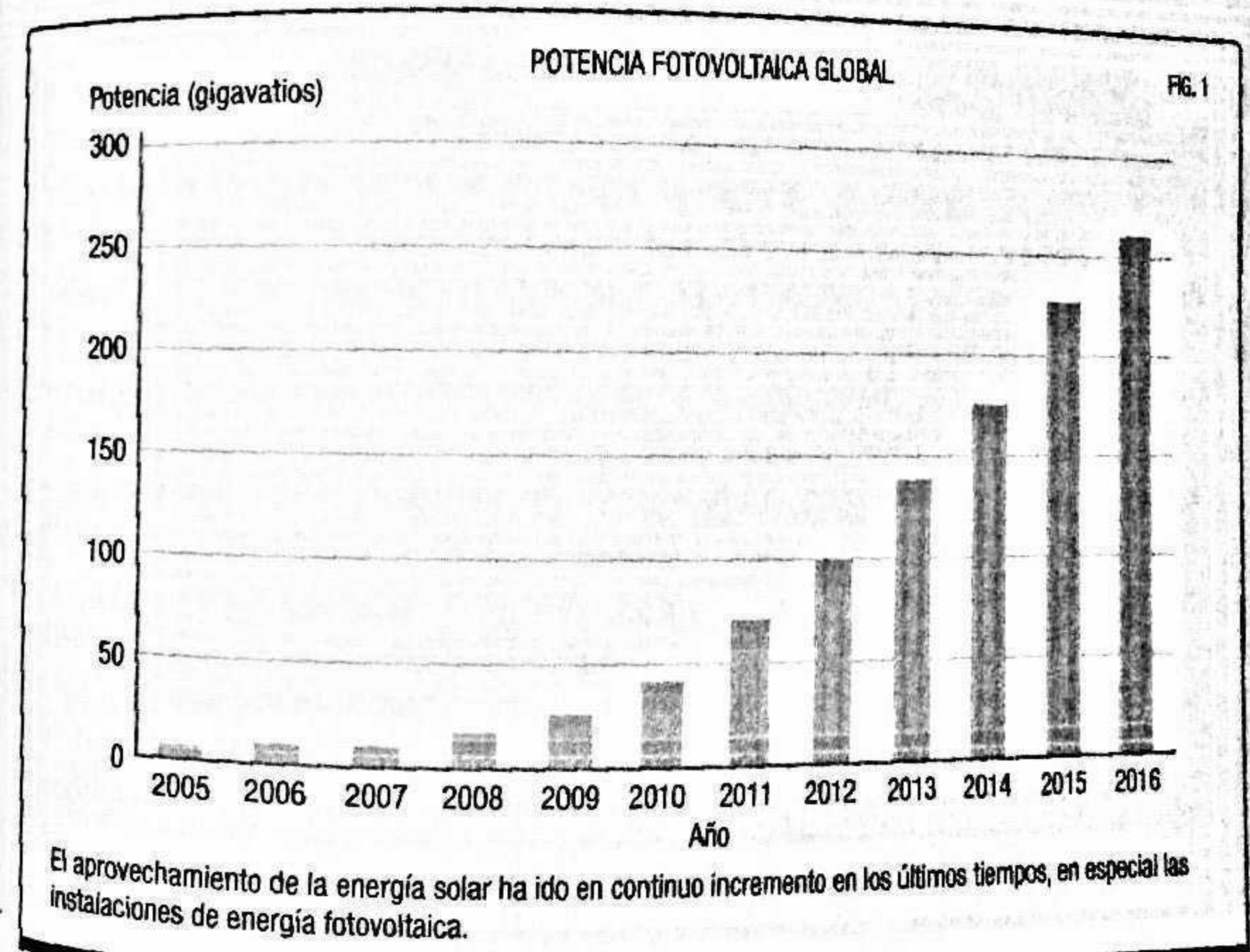
Durante los casi seis años de misión, los materiales a bordo del LDEF sufrieron diversos grados de degradación. Tras una exposición a la luz solar tan prolongada, algunas láminas para protección contra altas temperaturas se volvieron marrones e incluso se rajaron. La superficie exterior del LDEF tenía adherida partículas de berilio-7 radiactivo, producido cuando los rayos cósmicos interaccionan con los átomos de nitrógeno y oxígeno de las capas superiores de la atmósfera, y algunas láminas de teflón mostraron huellas de impactos debidos a micrometeoroides y restos de cohetes. Los investigadores lograron incluso detectar una reducción en la cantidad de impactos durante el primer año de misión debido a la interrupción en los vuelos del transbordador tras el desastre del *Challenger*. En cuanto a la durabilidad de especímenes vivos, un conjunto de esporas que formaba parte del experimento alemán *Exostack* mostró un grado de supervivencia de hasta el 80%.

Los resultados del experimento LDEF mostraron que una instalación orbital puede sobrevivir al duro ambiente espacial, en el supuesto de que se construya con materiales duraderos y se tomen precauciones adecuadas para protegerla contra micrometeoroides, pequeños fragmentos de basura espacial y radiación. Esta información ayudó a la construcción y despliegue de estaciones espaciales posteriores; estas, a su vez, extendieron la experiencia

del LDEF mediante diversos experimentos como el MEEP (*Mir Environmental Effects Payload*) de la Mir y el MISSE (*Materials International Space Station Experiment*) de la Estación Espacial Internacional. La experiencia conjunta de todos estos experimentos contribuirá al futuro desarrollo de grandes instalaciones para producir energía y materiales aprovechando las condiciones ambientales del espacio.

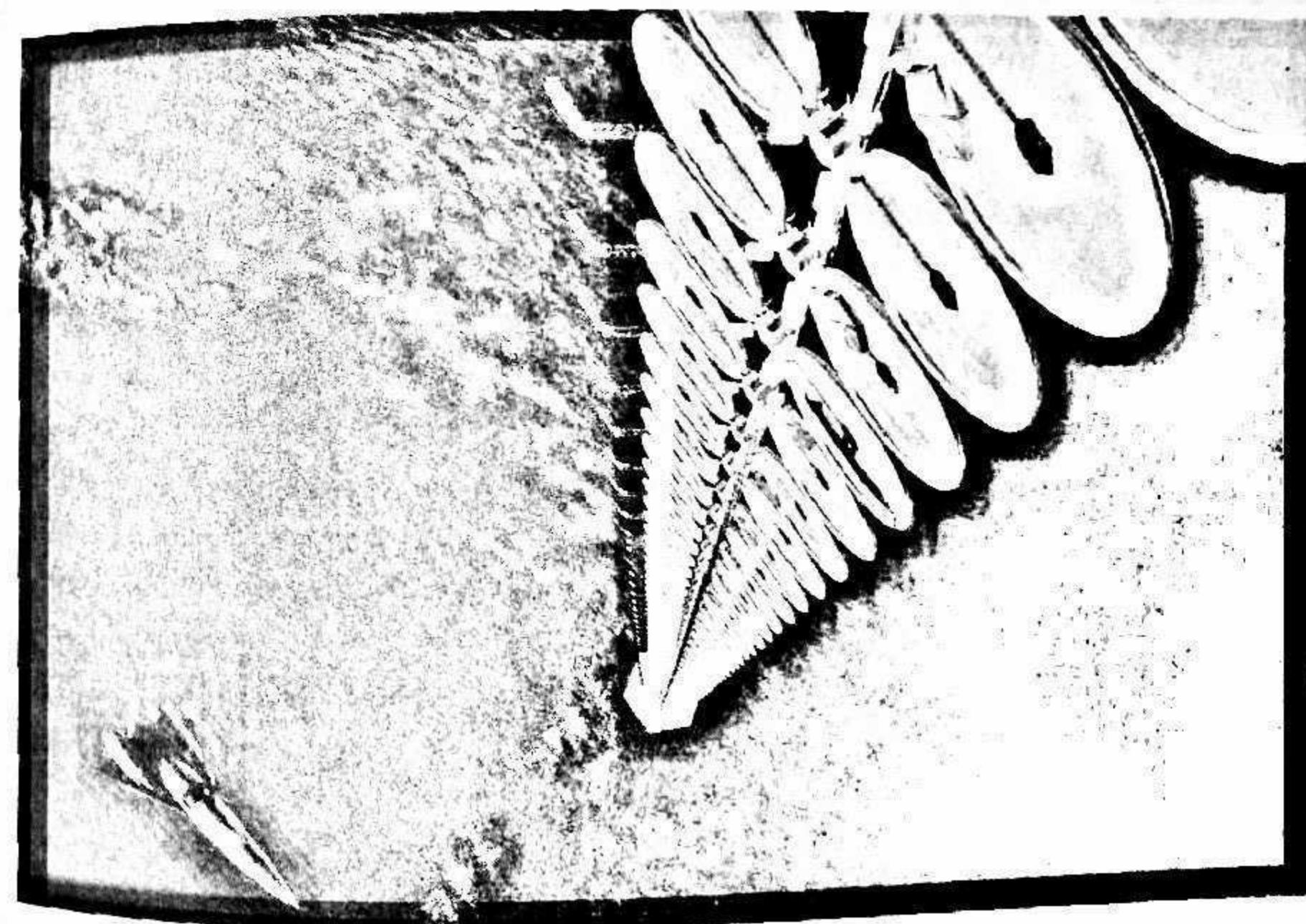
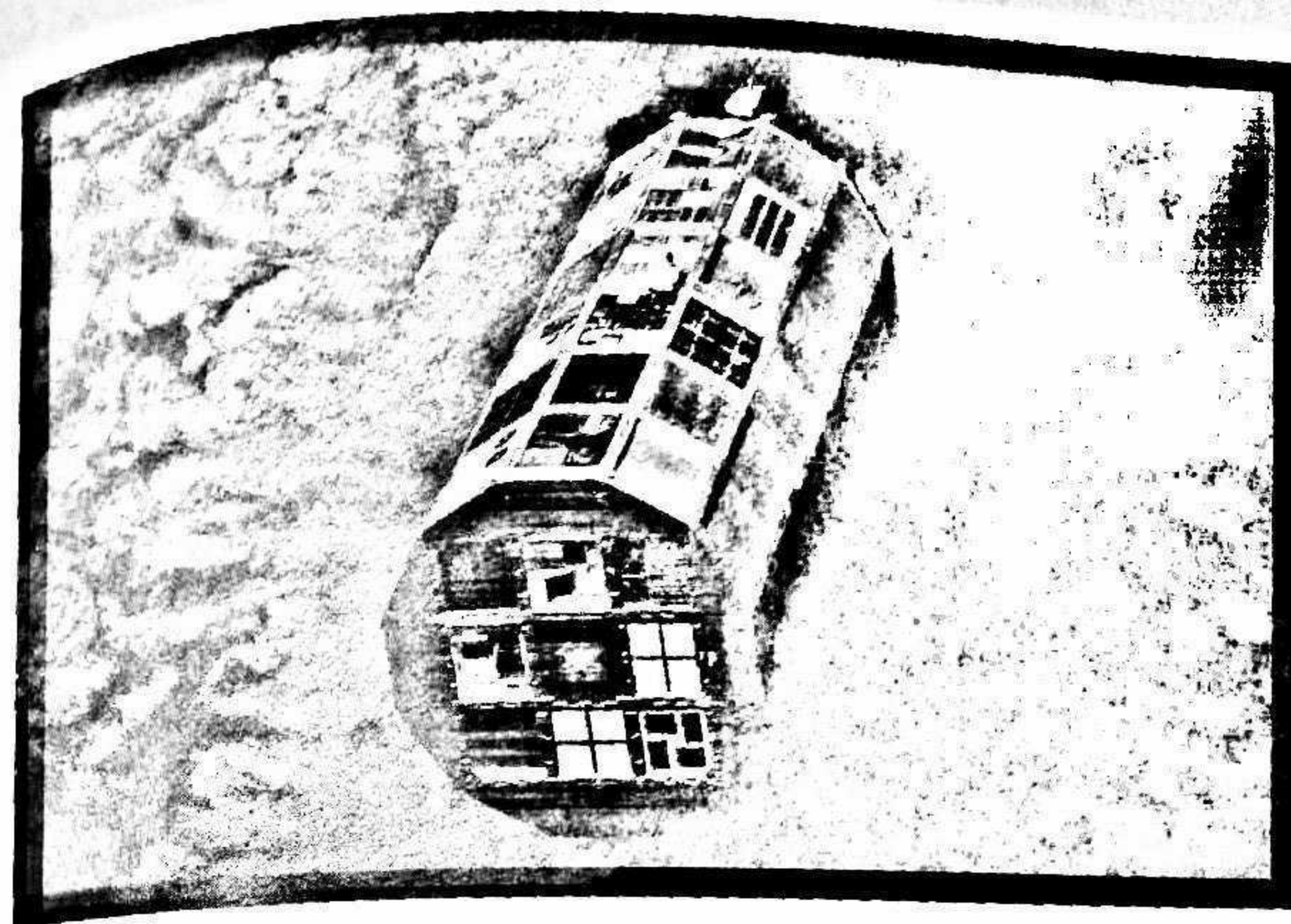
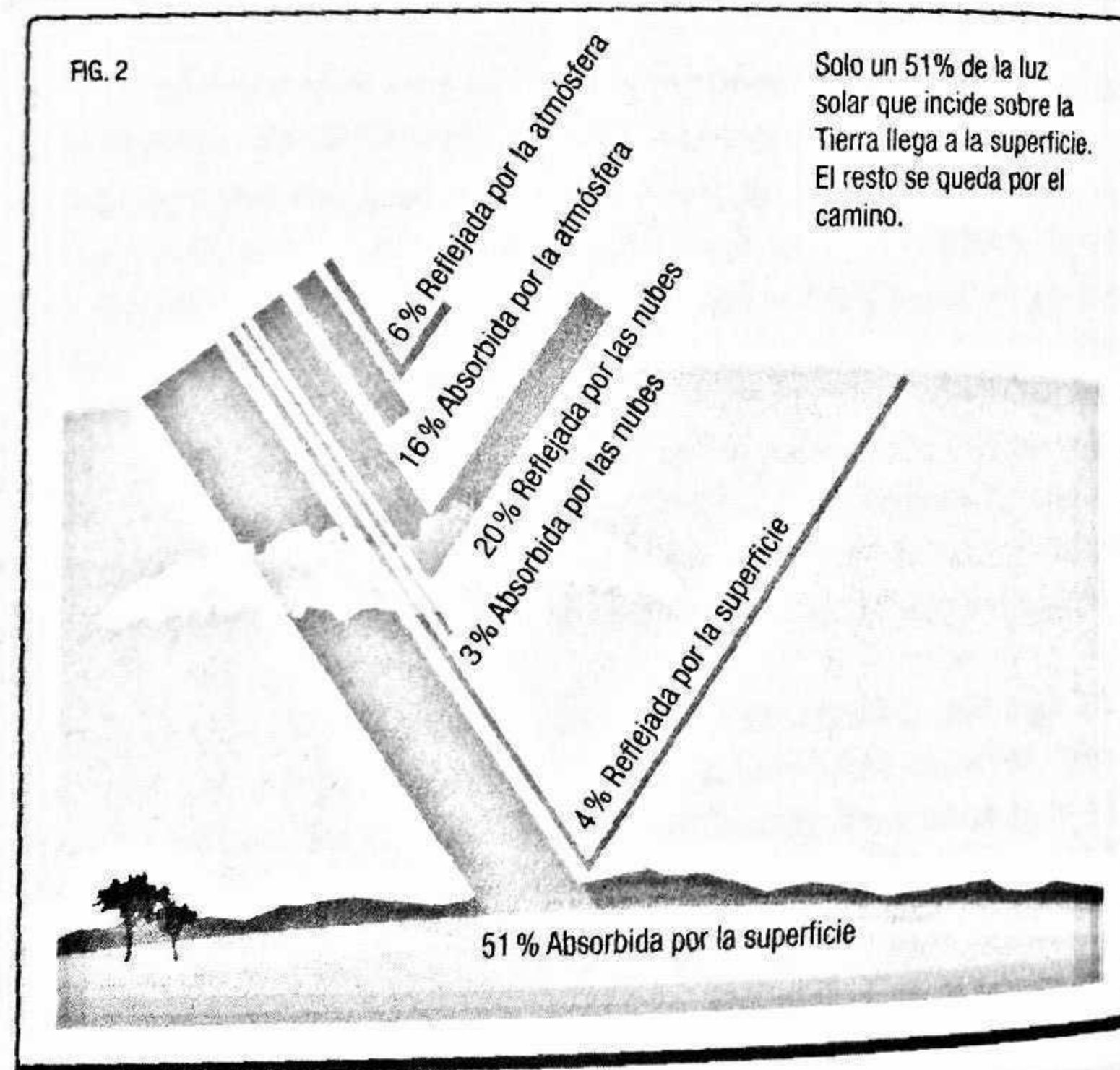
EL ESPACIO: ¿FUENTE DE ENERGÍA ILIMITADA?

El Sol es la fuente de energía que sustenta la vida en la Tierra, y también contribuye con un porcentaje creciente a la generación de energía en diversas formas. La instalación de placas fotovoltaicas se ha extendido en los últimos años en los principales países industrializados, constituyendo en la actualidad casi un 7% de la potencia eléctrica instalada en España (figura 1).



El principal inconveniente de la energía fotovoltaica es que gran parte de la energía solar incidente se pierde durante el camino. La atmósfera terrestre contiene gases, partículas sólidas, nubes y otros elementos que absorben y dispersan la luz del Sol, especialmente cuando se encuentra cerca del horizonte. Dependiendo de la latitud y de la hora del día, la energía restante que llega a las placas solares se reduce aún más (figura 2). Y un problema evidente: por la noche no brilla el Sol.

Para evitar estas barreras, no hay nada como salir de la atmósfera terrestre. Una superficie de un metro cuadrado en órbita baja puede recibir hasta 1 400 vatios de potencia constante e ininterrumpida. La mayoría de las sondas espaciales, incluida la Estación Espacial Internacional, reciben su suministro eléctrico mediante paneles fotovoltaicos, así que ¿por qué no aumentar la superficie colectora y proveer a la Tierra de la energía que necesita?



Arriba, el satélite LDEF de la NASA concebido para testar la durabilidad de los materiales en el espacio. Abajo, representación de la torre solar Suntower ideada en 1997 por la NASA para la generación de energía solar en el espacio.

A razón de 1,4 kilovatios por metro cuadrado, una superficie circular de un kilómetro de diámetro recibiría cerca de un gigavatio de potencia luminosa del Sol, cantidad similar a la generada por una central nuclear. Por supuesto, eso presupone que las placas fotovoltaicas convierten la luz en electricidad con una eficiencia del 100 %, pero es un punto de partida.

Los primeros proyectos para generar energía en grandes cantidades en el espacio se desarrollaron durante la crisis energética de los años setenta. Se idearon grandes estructuras destinadas a captar la luz solar con un alto grado de eficiencia. Como la torre Suntower (véase la imagen inferior de la pág. 141). La energía, convertida en un denso haz de microondas, sería transmitida hacia la superficie terrestre, donde antenas colectoras lo recogerían y transformarían en electricidad.

Una estructura tan grande requiere el envío al espacio de enormes cantidades de materiales para ser construida, y el coste derivado de esa empresa fue uno de los motivos que enfrió la idea de usar el espacio como fuente de energía. Con todo, la creciente demanda energética está disparando la generación y emisión de CO₂ a la atmósfera, acrecentando con ello el efecto invernadero y aumentando la presión para producir energía de forma más limpia. Paralelamente, las últimas décadas han traído una serie de avances técnicos que acercan la tecnología solar cada vez más al punto de viabilidad.

Uno de los países más activos en la investigación de Sistemas de Energía Solar en el Espacio (SPSS, por sus siglas en inglés) es Japón, un país carente de recursos energéticos propios que, tras el accidente nuclear de Fukushima, se encuentra más ansioso que nunca por reducir su dependencia energética. Sus planes incluyen una central solar de una potencia de varios kilovatios para 2018, un sistema SPSS operativo de 100 kilovatios para 2020 y, si el proyecto demuestra su viabilidad, una central comercial de un gigavatio de potencia para 2030.

Los obstáculos técnicos son enormes y se agrupan en tres campos: construcción, generación y transmisión. Una plataforma solar de un gigavatio tendrá una superficie de al menos cuatro kilómetros cuadrados y una masa de unas 10 000 toneladas.

Una estructura de ese tamaño solamente podrá ser construida en un plazo razonable mediante robots, y la puesta en órbita hará necesaria la creación de grandes cohetes para el lanzamiento.

La captación y generación de energía es una tecnología conocida que tendrá que ser mejorada para evitar las inevitables pérdidas durante el proceso de obtención y transformación de energía. El rendimiento de estos sistemas se estima ahora en un 40 % y, a pesar de las pérdidas, representa una gran mejora en comparación a los colectores solares instalados en tierra.

En cuanto a la transmisión de la energía captada, hay dos tecnologías a considerar: láseres o haces de microondas. Ambos sistemas tienen sus ventajas e inconvenientes, y ninguno es netamente superior al otro. El láser puede ser generado, disparado y recibido de forma más sencilla y con sistemas más pequeños debido a su menor longitud de onda, pero la luz visible es más sensible a la dispersión por parte de la atmósfera, y puede resultar perjudicial para el ojo humano; las microondas, en cambio, aunque necesitan de equipo más extenso, pueden atravesar las nubes y la lluvia sin pérdidas de energía apreciables.

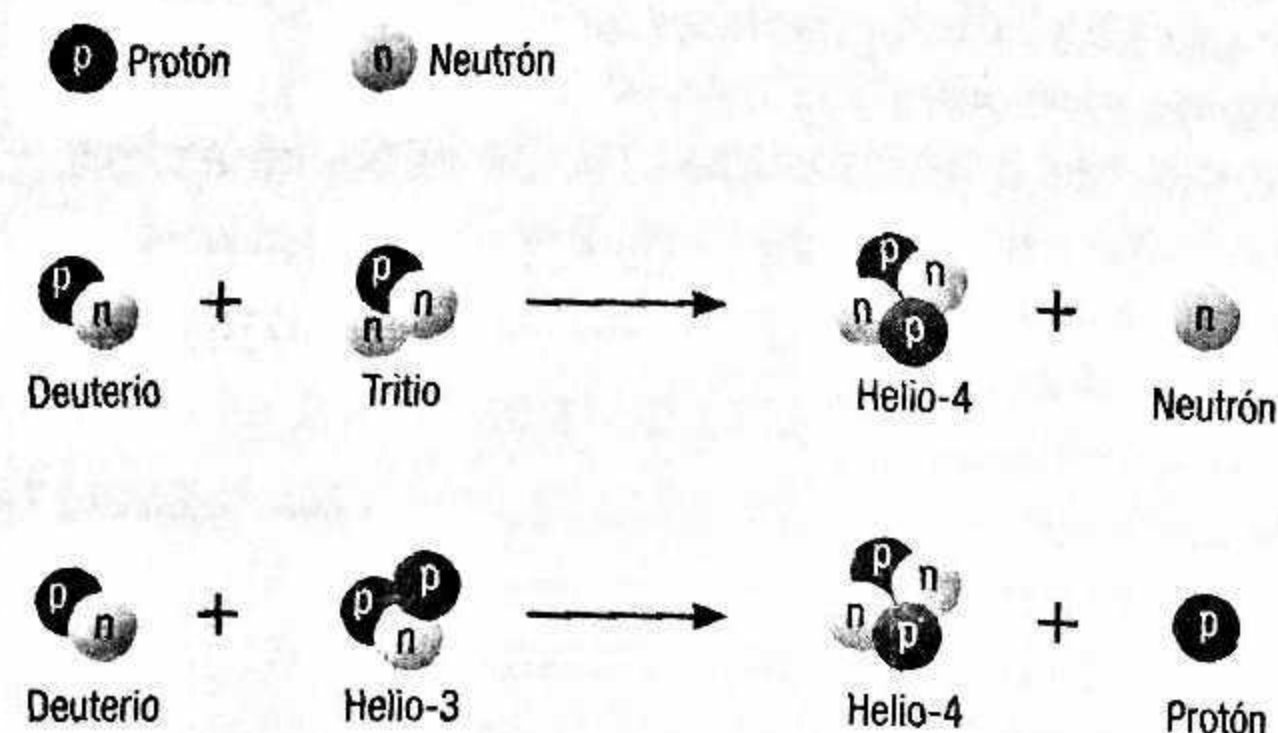
Es interesante reseñar que, incluso si el SPSS japonés acaba siendo un proyecto fracasado, las tecnologías que está desarrollando tendrán gran impacto en la Tierra. Los avances en la captación de energía solar y transmisión por haces de microondas, por ejemplo, pueden aplicarse en la Tierra creando campos de placas solares en el desierto y enviando la energía a donde se necesita, o bien sustituyendo las líneas de alta tensión de las redes eléctricas actuales por haces compactos de microondas.

Una segunda posibilidad de extraer energía en el espacio es de origen nuclear. Desde hace décadas se ha estado desarrollando la energía de fusión, en la que dos núcleos ligeros producen uno más masivo y liberan energía en el proceso (figura 3). La fusión es el proceso que genera energía en las estrellas. Existen diversas reacciones nucleares en las que núcleos ligeros se fu-

La exploración espacial es una fuerza de la naturaleza en sí misma, sin rival en ninguna otra fuerza de la sociedad.

NEIL DeGRASSE TYSON

FIG. 3



Durante una reacción de fusión nuclear, varios núcleos atómicos se unen y forman un núcleo más pesado. Ese proceso libera una gran cantidad de energía. La reacción deuterio-tritio libera un neutrón que puede convertir la materia en radiactiva. En cambio, deuterio y helio-3 liberan un protón, susceptible de ser bloqueado y, por tanto, de generar cero residuos.

sionan, emitiendo energía en el proceso, y se espera que cuando la tecnología esté lo bastante desarrollada se convertirán en una fuente limpia de energía.

Una de las mayores ventajas de la fusión sobre la fisión nuclear es la ausencia casi total de residuos radiactivos; con todo, la mayoría de las reacciones de fusión producen neutrones, que al interaccionar con la materia que le rodea puede convertirla en radiactiva. Un particular tipo de reacción, en la que interviene el helio-3, no emite neutrones sino protones que, al tener carga eléctrica, pueden ser bloqueados con un campo magnético, lo cual evitaría la generación de residuos radiactivos.

El helio-3 es casi inexistente en la Tierra pero el Sol lo lanza en grandes cantidades por todo el sistema solar, de modo que no hay más que salir al espacio y recogerlo. En este caso ni siquiera necesitamos grandes instalaciones de recogida porque ya tenemos una estación colectora en órbita esperando ser utilizada: la Luna. Durante miles de millones de años, el viento solar ha depositado partículas de helio-3 en el primer metro de regolito lunar (depósito rocoso de la superficie), y no hay más que recogerlo.

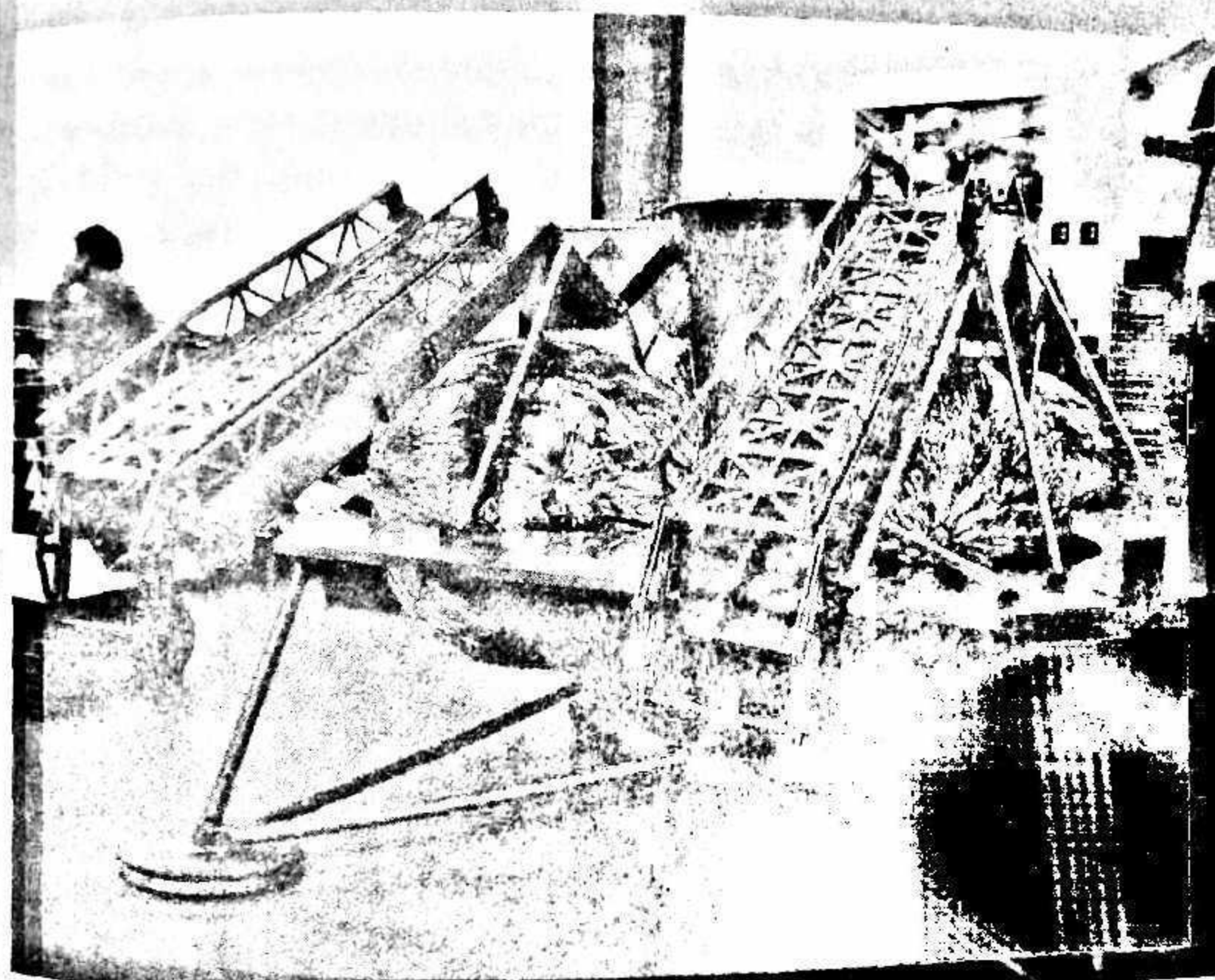
Aunque la tecnología de fusión está aún lejos (por no hablar de la tecnología de minería lunar), el valor del helio-3 como fuente de energía se estima en unos tres mil millones de euros el kilo-

LA CARRERA LUNAR DE GOOGLE

Durante los últimos diez años la Luna ha recibido sondas construidas por Europa, Japón, China, India y Estados Unidos. Puede que pronto se una al club otro miembro: Google. El buscador de internet presentó en 2007 el desafío Google Lunar XPRIZE, abierto a todos los equipos del mundo. Un cheque de 20 millones de dólares premiará al primer equipo que construya una nave capaz de alunizar sobre nuestro satélite, recorrer quinientos metros y enviar dos transmisiones desde la Luna; hay otros premios, como el de cuatro millones por efectuar la transmisión en uno de los lugares de alunizaje del programa Apolo.

Competencia a cinco manos

Cinco equipos llegaron a la final de la competición: Moon Express (EE. UU.), Teamindus (India), Spaceil (Israel), Hakuto (Japón) y Synergy Moon (Internacional). Todos ellos han conseguido un cohete y desarrollado un módulo de alunizaje o un rover, y deben efectuar el lanzamiento para finales de 2017. Mientras que los indios optaron por la cooperación con un lanzamiento conjunto con Japón, Moon Express tiene ambiciones en el campo de la minería lunar. El grupo español Barcelona Moon Team se quedó en tierra, pero el chileno AngelicvM espera llegar a la Luna en 2019.



Aterrizador de la Universidad Carnegie-Mellon.

gramo, por lo que el millón largo de toneladas que se estima está depositado en la superficie lunar constituye un aliciente muy poderoso, especialmente para empresas privadas. Hay cantidades mucho mayores de helio-3 en las atmósferas de los grandes planetas exteriores, que pueden ser usadas para generar energía en la Tierra y también para desarrollar las futuras colonias humanas en los satélites de Júpiter y Saturno.

MINERÍA EN LOS ASTEROIDES

La Tierra es un pozo gravitatorio del que cuesta salir, y enviar una tonelada de acero o agua al espacio requiere una gran cantidad de energía. Es mucho más eficaz buscar los materiales en el espacio y construir allí. La Luna es un buen lugar para obtenerlos. Se estima que nuestro satélite tiene depósitos de hierro, cobalto, oro, platino, titanio y uranio, además de agua; pero sería aún mejor minar un asteroide, ya que su campo gravitatorio es muy débil y el transporte de material desde su superficie sería más sencillo.

Los astrofísicos han clasificado los asteroides en tres grupos dependiendo de su composición: C, S y M. Los asteroides de tipo C contienen abundantes compuestos de carbono y agua, los de tipo S se componen de silicatos de magnesio y aluminio, y los de tipo M son ricos en metales como níquel, hierro y platino. La mayoría de los asteroides se encuentran en el cinturón que se extiende entre Marte y Júpiter, pero algunos de ellos se aproximan a la Tierra a intervalos regulares, lo que permitiría desviarlos para situarlos en órbita terrestre.

No es fácil cambiar la órbita de una roca de billones de toneladas de masa pero se han desarrollado diversos conceptos gracias a una actividad distinta a la minería: la defensa planetaria. Conscientes de que la caída de un gran asteroide o cometa podría producir graves daños que, en caso extremo, quizá inducirían a la extinción de nuestra especie, y a la vista de precedentes como el impacto de Tunguska en 1908 y el más reciente de Chelyabinsk en 2013, científicos e ingenieros están desarrollando

diversos proyectos para detectar, desviar y, en su caso, destruir, todo objeto que se acerque a la Tierra de forma peligrosa.

La estrategia contra los objetos cercanos a la Tierra (NEO: *Near Earth Objects*) comienza con su detección. No se trata de una tarea fácil. En el pasado se ha utilizado el radar para sondear cuerpos celestes de posición conocida, pero las técnicas de detección mediante radar, muy eficaces en la atmósfera terrestre, resultan inviables para detectar un objeto a millones de kilómetros de distancia que puede aparecer por cualquier dirección.

Resulta más sencillo utilizar la luz visible, y por fortuna las modernas técnicas de detección han liberado al astrónomo de la tediosa tarea de examinar el cielo, región por región, en busca de puntos de luz que cambien de posición. Los sistemas de detección actual se basan en un conjunto de telescopios que examinan el cielo de forma automatizada, y el satélite de infrarrojos WISE ha resultado ser un complemento excelente en esta tarea. Gracias a estos instrumentos, en octubre de 2016 la NASA pudo detectar un asteroide gigante en las cercanías de la Tierra con cinco días de preaviso. No era el primer NEO conocido, pero sí fue el primero en ser detectado y seguido como si fuese una intrusión de tipo militar, permitiendo dar la alarma en caso necesario. Por primera vez, la humanidad tiene algo parecido a un mando de alerta temprana mundial.

Detectar un NEO es una cosa; desviarlo es otra muy distinta. Si un gran asteroide se dirige directamente hacia la Tierra, no hay gran cosa que se pueda hacer. La opción favorita del cine es la nuclear, debido a que es una gran fuente de energía que podría usarse para desviar o destruir un cuerpo rocoso. En efecto, una explosión superficial o subsuperficial puede vaporizar una parte del cuerpo, actuando como un cohete que impulsa al resto en una dirección que lo aleje de la Tierra; pero el cuerpo puede estar compuesto de trozos débilmente unidos, o estar constituido por montones de rocas, con lo que se corre el riesgo de convertir un objeto peligroso en muchos, por lo que recurrir a las armas nucleares es una opción que debe ser evaluada con sumo cuidado.

Existen opciones no nucleares asimismo eficaces. Una de ellas consiste en pintar zonas del cuerpo celeste con colores bri-

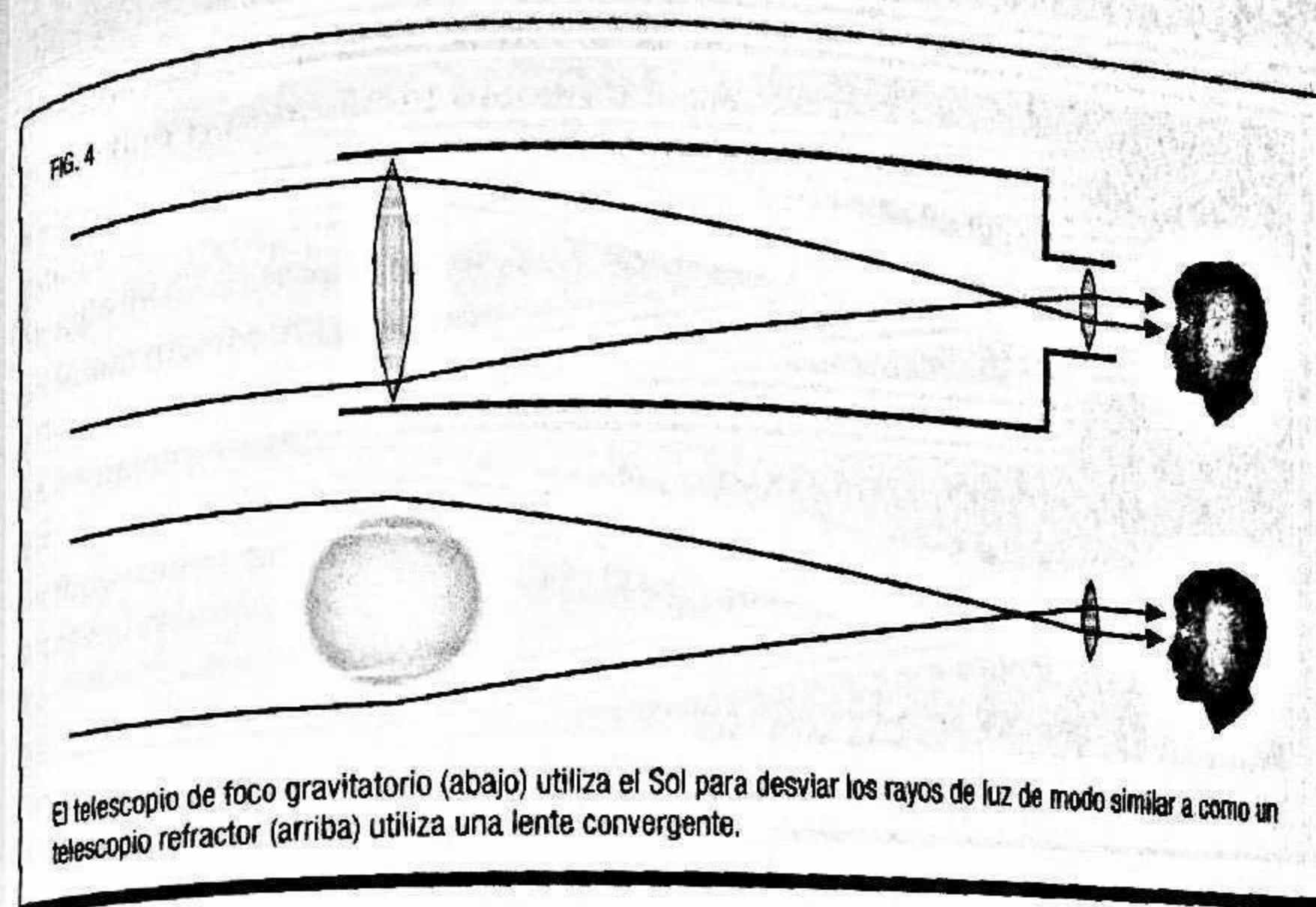
llantes u oscuros para reflejar o absorber la luz, aprovechando así la presión de radiación solar como medio de propulsión. El uso de láseres permitirá calentar y vaporizar ciertas zonas de forma controlada, creando así el equivalente a cohetes naturales en la superficie del cuerpo. Se puede utilizar una vela gigante para aprovechar las partículas del viento solar, de forma similar a como un velero usa el viento para navegar por el mar. Hay ideas aún más exóticas y, en general, todas ellas se basan en su aplicación durante largos periodos de tiempo, permitiendo variar la trayectoria del cuerpo mediante fuerzas relativamente pequeñas; algo que resulta ideal si lo que se desea es desviar y capturar un asteroide en lugar de destruirlo.

Una vez en órbita, un asteroide o un cometa nos proporcionará una gran cantidad y variedad de materiales, que pueden enviarse a la Tierra o ser usados *in situ* para construir todo tipo de emplazamientos. De ese modo, el espacio abierto no será solo un medio para mejorar la vida en la Tierra sino también un fin en sí mismo.

CIENCIA COLOSAL

En un futuro cercano las aplicaciones científicas se beneficiarán de las técnicas de construcción a gran escala en el espacio, de formas que ahora apenas podemos imaginar. Dos de ellas, en fase de estudio en la actualidad, pueden servir como ejemplos: el acelerador de partículas espacial y el telescopio de foco gravitatorio (figura 4).

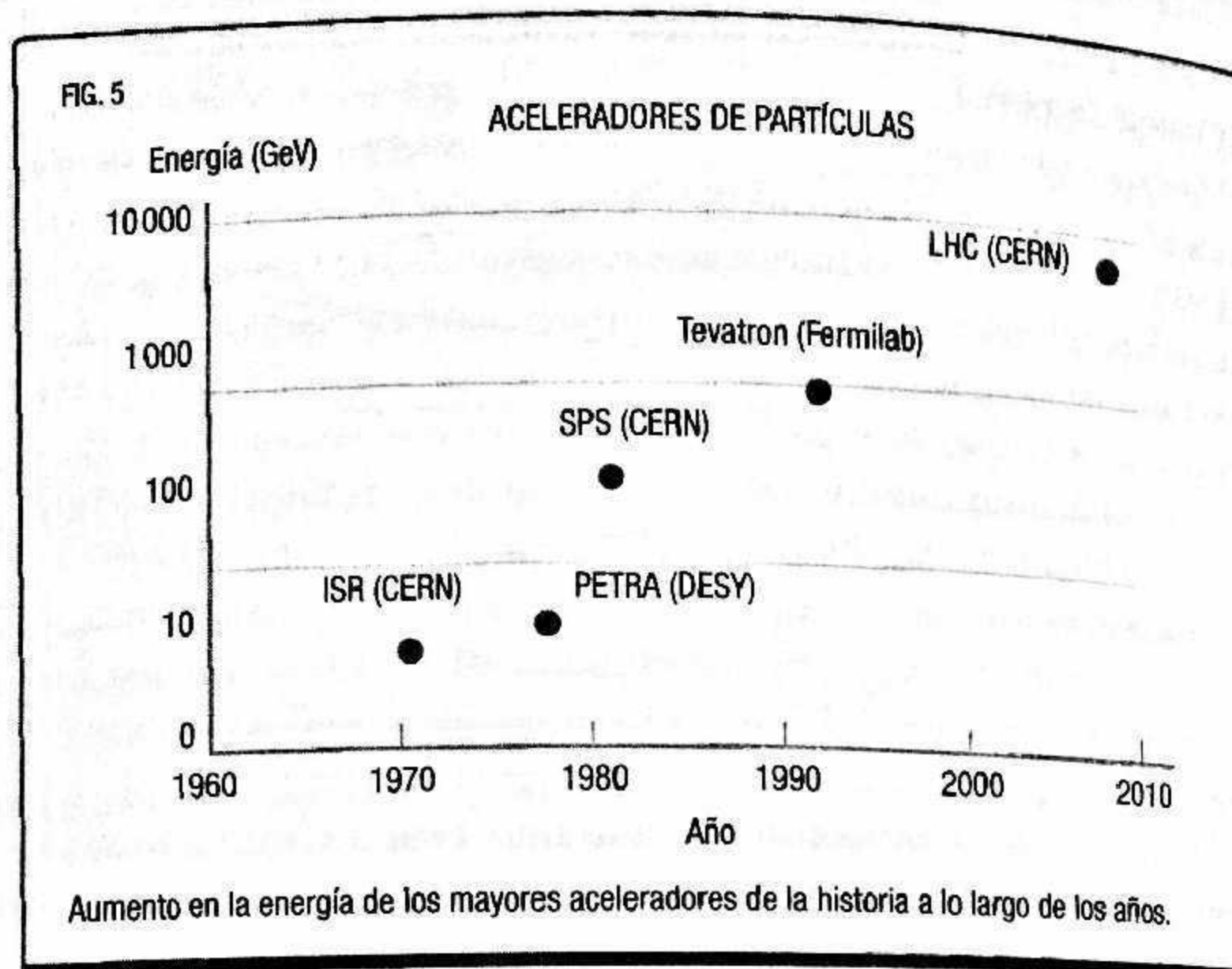
La investigación de los objetos más minúsculos de la naturaleza requiere la construcción de enormes estructuras a las que llamamos aceleradores (o colisionadores) de partículas. Dependiendo de su geometría pueden clasificarse en dos grandes grupos: aceleradores lineales y circulares. En ambos casos el proceso básico es el mismo: se toman partículas con carga eléctrica, se las introduce en el seno de un campo eléctrico, y su energía cinética se incrementa. Una vez aceleradas las partículas chocan entre sí, y durante un brevísimo intervalo de tiempo, se generan par-



tículas nuevas, se ponen en acción fuerzas de alcance casi nulo y se obtiene una instantánea de la física a escala de altas energías. Gracias a ello los físicos de partículas han logrado desarrollar el llamado *modelo estándar*, que describe el universo en función de un corto número de partículas e interacciones fundamentales.

Quedan muchas preguntas por resolver en física fundamental, y la posibilidad de obtener respuestas está limitada por la energía que alcanzan las partículas, que a su vez depende del tamaño de la estructura donde son aceleradas. El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, resultado de la colaboración internacional, es en la actualidad el acelerador de partículas más potente del mundo (en la figura 5, los aceleradores existentes y el incremento de energía conseguida con el tiempo). Tiene una circunferencia de 27 kilómetros, consume tanta potencia como la cercana ciudad de Ginebra, en Suiza, y uno de sus detectores, el llamado CMS, tiene una masa de 14 000 toneladas. Superar esas marcas requerirá avances de ingeniería y un esfuerzo económico sin precedentes.

Consciente de que las capacidades de un colisionador circular dependen del radio de su circunferencia, el físico italiano Enrico



Fermi (1901-1954) tuvo en 1940 la ocurrencia de sugerir el acelerador definitivo, un colisionador de 40 000 kilómetros que se extendiese a lo largo de la circunferencia de la Tierra. Esta máquina, apodada Fermitrón, es tan solo un sueño, una idea nacida de la imaginación de los físicos de partículas para establecer un límite conceptual al tamaño máximo de un acelerador de partículas en la superficie terrestre.

Construir un acelerador de partículas en el espacio tiene diversas ventajas, incluso sin llegar al tamaño del Fermitrón. En un entorno ingravido, no se precisan grandes estructuras de soporte para sustentar los diversos elementos que lo componen. Puesto que no necesita un túnel o una estructura cerrada, puede construirse como una serie de módulos que precisarán menor cantidad de materiales que su análogo terrestre. Cuando quiera actualizarse el sistema para obtener partículas de más alta energía bastará con añadir más módulos en lugar de tener que perforar otro gran túnel y equiparlo. De ese modo, los aceleradores espaciales pueden lograr un tamaño y unas prestaciones que harán palidecer a los contruados (o a los que se puedan

construir en un futuro) en tierra, permitiendo grandes avances en física de partículas.

El espacio tiene otras dos propiedades muy útiles cuya obtención en tierra resultan caras y difíciles: vacío y baja temperatura. El vacío es necesario para que las partículas aceleradas viajen sin impedimentos, y una baja temperatura permite que los imanes necesarios para la aceleración de partículas funcionen en estado superconductor (es decir, sin oponer resistencia eléctrica), con un consumo mínimo de energía. En una órbita alejada de la Tierra el vacío es tan alto que el «tubo» acelerador por donde viajan las partículas puede estar perfectamente abierto. En cuanto al enfriamiento a baja temperatura, bastará con escudar el sistema contra la luz del Sol para conseguir un frío cercano al cero absoluto (esto es, aproximadamente, unos -273°C).

De lo más pequeño saltamos a lo más grande. En la actualidad el telescopio óptico James Webb está a punto de recoger el testigo del Hubble. No será el telescopio más grande del mundo, pero su ubicación fuera de la atmósfera terrestre le permitirá conseguir imágenes con una calidad nunca vista. Cualquiera que sea su tamaño o ubicación, un telescopio óptico tiene principios físicos comunes. Recoge los haces de luz procedentes de una estrella y los concentra en un punto gracias a un espejo reflector o a una lente, lo que permite obtener una imagen más grande y con mayor lujo de detalles que el original. Para ello se utilizan dos propiedades de la materia, la refracción y la reflexión, que da lugar a los telescopios refractores y reflectores, respectivamente.

Existe una tercera forma de desviar los haces de luz para producir imágenes, y es utilizar un campo gravitatorio. El efecto, predicho por Albert Einstein en 1936, se denomina *lente gravitatoria*. Los astrofísicos han descubierto diversos casos de focalización de luz mediante este efecto, obteniendo varias imágenes de un objeto lejano (como un cuásar) al pasar cerca de una masa grande (como una galaxia), y en algunos casos ha permitido incluso detectar planetas extrasolares.

Para que una lente sea útil a efectos de observación deberíamos ser capaces de enfocar de modo que los rayos de luz con-

verjan en un punto llamado foco. En el caso de los telescopios y otros instrumentos ópticos el enfoque resulta sencillo de hacer, pero para enfocar un telescopio gravitatorio es preciso acumular una masa tan grande que escapa a las posibilidades actuales de la técnica. Una opción más sencilla es utilizar un dispositivo natural como el Sol. En principio basta con observar alrededor de nuestra estrella para obtener una imagen de cualquier cuerpo que se encuentre detrás suyo, incluso si se encuentra a miles de años-luz; en este caso «imagen» se refiere no solo a luz visible, ya que también se puede observar en longitudes de ondas de radio, microondas o ultravioleta.

Usar el Sol como lente gravitatoria plantea diversos problemas, y el principal es la enorme distancia a la que se encuentra su foco: unas 550 unidades astronómicas o UA (1 UA es la distancia Tierra-Sol). La nave más lejana construida por el ser humano, la Voyager 1, lleva viajando desde 1977 para estudiar los límites del sistema solar, pero apenas se ha alejado del Sol la quinta parte de esa distancia, por lo que estamos hablando de una misión sin precedentes. Una sonda que se halle tan lejos del sistema solar tardará más de tres días en recibir cualquier instrucción que se le envíe por radio desde la Tierra.

La formación de la imagen constituye otro desafío. Cualquier objeto que observamos en el universo se mueve. En un observatorio con base en Tierra ese movimiento es prácticamente imperceptible, y solamente hay que preocuparse de la rotación de nuestro propio planeta; un telescopio de foco gravitatorio, por sus características, es mucho más sensible a los movimientos del objeto que se intente observar. Por su parte, el Sol no es una esfera perfecta de bordes definidos, y la capa exterior de gases, llamada corona solar, se extiende hasta un millón de kilómetros de distancia, lo que impedirá conseguir imágenes claras a distancias inferiores a unas 2000 UA. Incluso en las mejores condiciones, la imagen producida con una lente gravitacional es inherentemente borrosa.

Suponiendo que lográsemos solventar todos los problemas de ingeniería, queda una limitación geométrica importante. Al contrario que un instrumento óptico, que puede apuntar a cualquier zona del cielo de forma sencilla, un telescopio de foco

gravitatorio solamente podría examinar cuerpos que se encontrasen justo al otro lado del Sol. Para poder observar otra región del cielo, el telescopio tendría que moverse a lo largo de una esfera de centenares de UA de radio, algo impracticable y lento en la mayoría de los casos. A todos los efectos, las posibilidades de reenfocar serían nulas y tendríamos un telescopio para un solo objeto. Recuerda en cierto modo a algunas sondas espaciales, construidas para examinar un solo cuerpo de nuestro sistema solar.

Llegados a este punto resulta difícil imaginar por qué la comunidad científica debería plantearse siquiera la construcción de un telescopio de foco gravitatorio. Es hora de centrarse en las ventajas, consistentes en mayor tamaño y brillo de la imagen. Tanto los observatorios con base en tierra como los que operan en el espacio están limitados por el criterio de resolución de Rayleigh (propuesto por el físico británico John Rayleigh, 1842-1919), que impone el detalle mínimo que se puede obtener de una imagen, y en consecuencia el tamaño máximo de la misma. Más allá del criterio de Rayleigh, aumentar el tamaño de una imagen es como ver la fotografía de un periódico con un microscopio: solamente veremos un borrón de mayor tamaño.

El criterio de Rayleigh depende del tamaño del telescopio. En este caso, el propio Sol hace de telescopio, y el detalle que se puede apreciar en la imagen sería excepcional. Un telescopio de foco gravitatorio que observase un exoplaneta del tamaño de la Tierra en la estrella Próxima Centauri proporcionaría una imagen de más de 25 kilómetros de diámetro. Ningún detector de luz tiene ese tamaño, así que habría que observar el planeta a trozos, pero podría observarse fragmento a fragmento y obtener una imagen del planeta con una resolución de un kilómetro de tamaño. La imagen no solo sería muy grande sino también muy brillante, y para observaciones en el rango de microondas, el aumento en el brillo sería de varios billones.

Una misión a millares de unidades astronómicas de distancia está de momento fuera de las posibilidades de financiación actuales, pero no fuera de los límites tecnológicos concebibles a corto/medio plazo. Ya en los años ochenta la NASA consideró el

concepto científico TAU (*Thousand Astronomical Units*) para enviar una sonda a una distancia de mil unidades astronómicas. El concepto del telescopio de foco gravitatorio es un ejemplo representativo de hasta dónde puede llegar el ser humano en la búsqueda de respuestas; y más importante aún, de nuevas preguntas.

LECTURAS RECOMENDADAS

////////////////////////////////////

- ASIMOV, I., *El Universo*, Madrid, Alianza Editorial, 1973.
- BROCKMAN, M., *La ciencia del futuro*, Barcelona, RBA Libros, 2010.
- CHUVIECO SALINERO, E., *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*, Barcelona, Ariel, 2008.
- DEGRASSE TYSON, N., *Crónicas del espacio (contextos)*, Barcelona, Crítica, 2016.
- GALFARD, CH., *El universo en tu mano*, Barcelona, Blackie Books, 2016.
- GORE, A., *La Tierra en juego*, Barcelona, Planeta, 2009.
- O'NEILL, G.K., *Ciudades del espacio*, Barcelona, Bruguera, 1981.
- SAGAN, C., *Cosmos*, Barcelona, Planeta, 2004.
- SMOOT, G.; DAVIDSON, K., *Arrugas en el tiempo*, Barcelona, Plaza & Janés, 1994.
- WEYR, A., *El marciano*, Barcelona, Ediciones B, 2014.

ÍNDICE

////////////////////////////////////

aerosoles 23, 29, 30
Akatsuki 51
anomalía Pioneer 62
arqueología 37-40

Big Bang 89-91, 115

Calixto 58, 132
cambio climático 10, 13, 22, 23
capa de ozono 24, 25, 54, 98, 104, 105
Cassini 59, 70
CATS 30
Churyumov-Gerasimenko 75, 79
Cluster 26
COBE 90, 92, 93
Comte, Auguste 17
CubeSat 85-87
Curiosity 55
CYGNSS 34

Dawn 77

Deep Impact 79
dispersometría 34

Encélado 64, 70, 71, 132
energía fotovoltaica 139, 140
ESA 23, 26, 36, 57, 70, 71, 75, 78, 79, 85, 86, 92, 93, 95, 97, 106, 115, 136
espectrómetro 18, 28, 76, 106
Estación Espacial Internacional (EEI) 29, 30, 86, 101, 125-129, 131, 136, 137, 139, 140
Europa (satélite) 58, 68, 70, 71, 132
EUVE 108

Fermi (telescopio) 114
Fermión 150
foco gravitatorio (telescopio) 148, 149, 152-154

Galilei, Galileo 9, 43, 46, 51, 58, 60, 98

Galileo (sonda) 68-70, 76
 Ganímedes 58, 68, 71, 132
 Giotto 78
 GlobalXplore 38
 GOCE 36, 37
 Google 22, 145
 GOSAT 29
 GRACE 36
 Grand Tour 61, 64

 Halley (cometa) 78, 108
 Hayabusa 76, 77
 Helio-3 144, 146
 Hess, Victor 112
 Hubble (telescopio) 44, 89,
 101-104, 106, 107, 126, 151
 Huygens 70

 infrarrojos 17, 32, 54, 81, 84, 93-
 97, 100-102, 105, 147
 invierno nuclear 10, 49
 Ío 58, 61, 68, 132
 IRAS 94, 95
 ISO 95
 Itokawa 76, 77
 IUE 106-108

 James Webb (telescopio) 102-104,
 107, 151
 JAXA (Agencia Japonesa de
 Exploración Espacial) 89, 95
 Juno 68, 70
 Júpiter 26, 58-61, 63, 68, 70-72,
 76, 98, 99, 108, 132, 146

 Kuiper (observatorio) 94, 107

 lander (aterrizador) 52, 56
 Landsat 18-22
 LDEF 138, 139, 141
 LHC 149, 159

Lidar (LIDAR) 18, 38
 LISA 113, 115
 Lowell, Percival 51
 Luna 8, 9, 39, 43, 44, 46, 47, 52,
 65, 72, 74, 99, 102, 106, 112,
 128, 132, 144-146
 Lunar Orbiter 39

 Magellan (Magallanes) 51
 Mariner 44-46, 50, 52, 54
 Mars (sonda) 52, 54-58
 Mars Pathfinder 55
 Marte 10, 45, 49, 51-58, 72, 74, 76,
 122, 126, 128, 132, 146
 Mercurio 43-46, 48, 58, 60, 64,
 74, 132
 MESSENGER 45, 46
 Meteosat 32
 microondas 10, 17, 18, 89-94, 98,
 142, 143, 152, 153
 Mimas 64
 Mir 107, 128, 139
 multispectrómetro 18

 NASA 21, 22, 25, 26, 28, 29, 34,
 36, 38-40, 44, 45, 52-56, 58, 60-
 62, 64, 65, 68-72, 75, 76, 84, 86,
 87, 90, 92, 94-97, 100-102, 105,
 106, 108, 110, 111, 114, 115,
 123, 127, 128, 136, 138, 141,
 147, 153
 NEAR 76
 Neptuno 59, 61, 64, 71, 78
 neuroArm 125
 New Horizons 72-75

 OAO 105, 106
 Objetos cercanos a la Tierra
 (NEO) 96, 147
 ondas gravitatorias 12, 113-115
 Oort, nube de 78

Opportunity 55
 osteoporosis 122, 124, 125

Parcak, Sarah 36, 38,
 Philae 79
 Pioneer 59-65
 Pioneer Venus 50
 Planck (sonda) 92, 93
 Planicia Chryse 54
 Planicia Utopia 54
 Plutón 72-75, 94, 124, 132

radar 17, 18, 38, 46, 50, 51, 70,
 147
 radioastronomía 83, 88
 radiointerferometría 85
 radiómetro 18, 44
 radiotelescopio 47, 83, 85, 88
 rayos cósmicos 84, 112, 114, 121,
 138
 rayos gamma 17, 46, 84, 108, 109,
 111, 114
 rayos X 10, 26, 33, 76, 81, 84, 107-
 110, 112, 113
 Rhea 64
 Rosetta 75, 79
 rover 55, 77, 145

Sagan, Carl 48-50
 Sakigake 78
 Saturno 58-61, 64, 66, 70-72, 132,
 146
 Schiaparelli, Giovanni 51, 52, 57
 Sheets, Payton 38
 Shoemaker-Levy 68, 108
 Skylab 123, 125, 136
 SOFIA 94
 SOHO 26
 Sojourner 55
 Sol 8, 9, 17, 23, 24, 26, 28, 33, 36,
 43, 44, 46, 48, 58, 60, 65, 72, 78,

79, 97, 104, 110-112, 114, 139,
 140, 142, 144, 149, 151-153

Spirit 55
 Spitzer (observatorio) 96, 97
 Spitzer, Lyman 99-101, 106
 SPSS 142, 143
 Sputnik 10, 47, 73
 Stardust 79
 Stereo 26
 Suisei 78

TAU 154
 teledetección 16-18, 22
 Tetis 64
 TIROS 32
 Titán 64, 70-72, 132
 TRACE 26
 transneptuniano, objeto (TNO)
 72-74

Ulysses 26
 Urano 59, 61, 64, 71, 94

 Vega 50, 78
 Vela (satélite) 111
 Venera 47, 50
 Venus 10, 43-48, 50, 51, 53, 58, 60,
 78, 99, 132
 Venus Express 51
 Viking 54, 55
 VLBA 88
 Voyager 61, 63-65, 71, 72, 152

Wild-2 79
 Wildt, Rupert 48
 WIND 23
 WIRE 95, 96
 WMAP 92, 93